

THESIS / THÈSE

DOCTEUR EN SCIENCES

Définition d'un indice d'interaction entre l'activité extractive et l'exploitation des eaux souterraines.

Collier, Louise

Award date:
2015

Awarding institution:
Université de Namur

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Table des matières

I	Introduction.....	15
I.1	Contexte général	15
I.1.1	Ressources en eau	15
I.1.2	Ressources en roches	17
I.1.3	Interaction lors de l'exploitation des deux ressources	20
I.1.4	Signature d'une charte de concertation.....	24
I.2	Objectifs de l'étude.....	24
I.3	Objectifs de la thèse.....	25
II	Recensement des données.....	27
II.1	Observations satellitaires	27
II.2	Visite du site et observations sur le terrain	27
II.3	Analyse de la carte topographique.....	28
II.4	Analyse de la carte géologique	28
II.5	Analyse de la carte hydrogéologique	28
II.6	Consultation des banques de données « Dix-sous » et BD-Hydro	29
II.7	Consultation de l'atlas du karst.....	29
II.8	Consultation des études d'incidence existantes	29
II.9	Synthèse hydrogéologique	30
II.10	Confidentialité des données	30
III	Contextualisation hydrogéologique.....	33
III.1	Paramètres spécifiques à la carrière.....	33
III.1.1	Contexte hydrogéologique	33
III.1.2	Contexte géologique	36
III.1.3	Contexte piézométrique	43
III.1.4	Synthèse de la situation en Région wallonne	46
III.2	Paramètres spécifiques à la masse d'eau souterraine	47
III.2.1	Position relative du site carrier et des captages pour la distribution publique.....	47
III.2.2	Production des captages.....	52
III.2.3	Potentiel qualitatif de l'eau souterraine	59
III.2.4	Synthèse de la situation en Région wallonne	62

III.3	Conclusion	63
IV	Etablissement d'un indice d'interaction	65
IV.1	Equation d'interaction	65
IV.2	Modèles de calcul	66
IV.2.1	Modèle des choix discrets.....	66
IV.2.1.1	Ensemble de choix.....	67
IV.2.1.2	Probabilités de choix.....	67
IV.2.1.3	Modèles RUM (Random Utility Models).....	67
IV.2.1.4	Choix du modèle Logit	69
IV.2.1.5	Obtention de probabilités.....	70
IV.2.2	Réseau de neurones artificiels	71
IV.2.2.1	Structure d'un réseau de neurones	71
IV.2.2.2	Importance de l'entraînement	73
IV.2.2.3	Intérêt de la méthode	73
IV.2.2.4	Application du réseau de neurones artificiels	73
IV.2.2.5	Validation du modèle.....	75
IV.3	Application du modèle des choix discrets	76
IV.3.1	Calcul de l'indice carrière.....	76
IV.3.2	Calcul de l'indice masse d'eau souterraine.....	78
IV.3.3	Calcul de l'indice d'interaction.....	79
IV.3.3.1	Validation mathématique.....	80
IV.3.4	Application des indices carrière, masse d'eau souterraine et d'interaction.....	81
IV.3.5	Évolution temporelle de l'indice d'une carrière	86
IV.4	Conclusion	86
V	Approche quantitative par modélisation	89
V.1	Introduction à la modélisation	89
V.2	Identification du contexte hydrogéologique	90
V.3	Construction du modèle conceptuel.....	91
V.3.1	Conceptualisation du modèle.....	91
V.3.2	Discretisation du modèle	92
V.3.3	Paramètres hydrogéologiques	93
V.3.3.1	Conductivité hydraulique.....	93

V.3.3.2	Coefficient d’emménagement	94
V.3.3.3	Piézométrie initiale	94
V.3.4	Conditions imposées au sein du domaine	94
V.3.4.1	Recharge	94
V.3.4.2	Condition rivière	96
V.3.4.3	Condition mur	99
V.3.5	Conditions aux frontières du domaine	99
V.3.5.1	Potentiel imposé.....	100
V.4	Simulations	101
V.4.1	Simulations avec variation de la conductivité hydraulique	101
V.4.2	Simulations avec approfondissement d’une carrière	104
V.4.3	Simulations avec variation de la nature du lit de la rivière.....	106
V.4.4	Simulations avec extension d’une carrière	109
V.4.5	Simulations avec présence de barrières hydrogéologiques.....	112
V.4.6	Simulations avec présence de puits pour la distribution publique.....	116
V.5	Conclusion	119
VI	Valorisation de l’indice d’interaction	121
VI.1	Investigations hydrogéologiques	121
VI.2	Sondage d’opinion	122
VI.2.1	Résultats obtenus pour l’ensemble des secteurs	122
VI.2.1	Résultats obtenus par secteur	125
VI.2.2	Conclusion	127
VII	Application à des cas concrets	129
VII.1	La carrière de la Boverie.....	129
VII.1.1	Introduction.....	129
VII.1.2	Les paramètres de l’indice carrière.....	130
VII.1.2.1	Le contexte géologique.....	130
VII.1.2.2	Le contexte hydrogéologique	131
VII.1.2.3	Le contexte piézométrique.....	132
VII.1.2.1	Indice carrière	133
VII.1.3	Les paramètres de l’indice masse d’eau souterraine.....	134
VII.1.3.1	La position relative du site carrier et des captages	134

VII.1.3.2	La production des captages.....	134
VII.1.3.3	Le potentiel qualitatif de l'eau souterraine	134
VII.1.3.4	Indice masse d'eau souterraine	135
VII.1.4	L'indice d'interaction	135
VII.1.5	Investigations réalisées	137
VII.1.6	Valorisation de l'étude hydrogéologique.....	144
VII.1.7	Conclusion	144
VII.2	La carrière de dolomie de Marche-les-Dames	145
VII.2.1	Introduction.....	145
VII.2.2	Les paramètres de l'indice carrière.....	145
VII.2.2.1	Le contexte géologique.....	145
VII.2.2.2	Le contexte hydrogéologique	146
VII.2.2.3	Le contexte piézométrique.....	147
VII.2.2.4	Indice de l'indice carrière	149
VII.2.3	Les paramètres de l'indice masse d'eau souterraine.....	149
VII.2.3.1	La position relative de la carrière et des captages	149
VII.2.3.2	La production des captages.....	150
VII.2.3.3	Le potentiel qualitatif de l'eau souterraine	150
VII.2.3.4	Indice masse d'eau souterraine	150
VII.2.4	L'indice d'interaction	151
VII.2.5	Investigations réalisées	152
VII.2.6	Valorisation de l'étude hydrogéologique.....	155
VII.2.7	Conclusion	155
VIII	Conclusions.....	157
IX	Perspectives	159
X	Bibliographie	161
X.1	Webographie.....	168
XI	Annexes.....	169
	Annexe 1 : Banque de données FileMaker Pro	169
	Annexe 2 : Exemple d'une fiche descriptive : la carrière d'Engis.....	171
	Annexe 3 : Tableau de l'ensemble des formations hydrogéologiques de Wallonie	174

Liste des figures

Figure I.1 : Carte des masses d'eau souterraine de Wallonie (http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas). .	16
Figure I.2 : Localisation des principales prises d'eau en Région wallonne ³	17
Figure I.3 : Localisation de l'activité extractive en Wallonie.....	18
Figure I.4 : Répartition des 160 carrières wallonnes selon la nature de la roche exploitée.	19
Figure I.5 : Répartition de la production moyenne annuelle de roches selon la nature des matériaux exploités. 19	
Figure I.6 : Répartition de la production moyenne annuelle de roches selon la nature des formations hydrogéologiques concernées.	20
Figure I.7 : Sites carriers exploités entre Tournai et Antoing (Google Earth).	21
Figure I.8 : Localisation des carrières réalisant de l'exhaure (pastilles bleues) et celles n'en réalisant pas (pastilles rouges) en Wallonie (Service Géologique de Wallonie).	22
Figure I.9 : Schéma d'exhaure dans une carrière suite à l'approfondissement du fond de fosse sous le niveau piézométrique de la nappe souterraine (Goodwin et al. 2007, modifié).	23
Figure III.1 : Ensemble des cartes hydrogéologiques déjà réalisées en Wallonie (légende : Annexe 3).....	34
Figure III.2 : Répartition des 160 carrières wallonnes dans les quatre catégories du paramètre « contexte hydrogéologique ».....	36
Figure III.3 : Les quatre contextes géologiques définis.	38
Figure III.4 : Exemple de la carrière de Tapoumont (carte hydrogéologique 57/3-4 de Froidchapelle – Senzeille).	39
Figure III.5 : Exemple des carrières de Triffoy et Royseux (carte hydrogéologique 48/3-4 de Huy - Nandrin). .	40
Figure III.6 : Exemple de la carrière d'Herbeton - Berthe (carte hydrogéologique 53/5-6 de Philippeville - Rosée).....	41
Figure III.7 : Exemple de la carrière Emond (carte hydrogéologique 67/7-8 de Florenville - Izel).	42
Figure III.8 : Répartition des 160 carrières wallonnes dans les quatre catégories du paramètre « contexte géologique ».....	43
Figure III.9 : Cote altimétrique du plancher supérieure à la cote piézométrique de la nappe souterraine.....	44
Figure III.10 : Cote altimétrique du plancher inférieure à la cote piézométrique de la nappe souterraine mais supérieure à celle du niveau de base régional.	44
Figure III.11 : Cote altimétrique inférieure à la cote piézométrique de la nappe et à la cote altimétrique du thalweg constituant le niveau de base régional.	45
Figure III.12 : Cote altimétrique inférieure à la cote piézométrique de la nappe et à la cote altimétrique du niveau de base régional dont le potentiel n'est plus imposé.	45
Figure III.13 : Répartition des 160 carrières wallonnes dans les quatre catégories du paramètre « contexte piézométrique ».....	46
Figure III.14 : Zones de surveillance et zones de protection d'un captage.	47
Figure III.15 : Localisation des sites carriers et des captages pour la distribution publique et de leurs zones de prévention.	49
Figure III.16 : Exemple des carrières de Loën et d'Hallembaye qui se situent dans les craies crétacées, hors de la zone d'alimentation du captage de la SWDE Wonck P1 (carte hydrogéologique 34-5/6 Tongeren - Herderen). 50	

<i>Figure III.17 : Exemple des captages pour la distribution publique Crèvecœur dont les zones de prévention éloignée et rapprochée s'étendent sur la zone de la carrière Les Petons (carte hydrogéologique de Silenrieux-Walcourt).</i>	51
<i>Figure III.18 : Répartition des carrières wallonnes dans les quatre catégories du paramètre « position relative de la carrière et les captages pour la distribution publique ».</i>	52
<i>Figure III.19 : Drains exploités par la SWDE et l'administration communale de Rendeux (carte hydrogéologique 49-7/8 Harzé – La Gleize).</i>	54
<i>Figure III.20 : Les galeries principales de Modave captent les sources à flanc de coteau le long du Hoyoux (carte hydrogéologique 48-7/8 Modave – Clavier).</i>	55
<i>Figure III.21 : La source de Tridaine exploitée par la Ville de Rochefort et l'Abbaye Saint Rémy constitue l'exutoire de l'aquifère des calcaires frasniens (carte hydrogéologique 59-3/4 Rochefort – Nassogne).</i>	56
<i>Figure III.22 : Exemples de catégories pour le paramètre de la production des captages pour la distribution publique d'eau potable.</i>	57
<i>Figure III.23 : Structure de la distribution publique d'eau en Wallonie (http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas/).</i>	58
<i>Figure III.24 : Répartition des carrières wallonnes dans les quatre catégories du paramètre « production des captages ».</i>	59
<i>Figure III.25 : Répartition des carrières wallonnes dans les quatre catégories du paramètre « potentiel qualitatif de l'eau souterraine ».</i>	61
<i>Figure IV.1 : Structure d'un réseau de neurones artificiels. Le neurone calcule la somme de ses entrées puis cette valeur passe à travers la fonction d'activation pour produire sa sortie.</i>	72
<i>Figure IV.2 : L'architecture du réseau de neurones comporte sept nœuds dans la couche cachée. La règle de décision consiste à sélectionner le nœud de sortie associée à la valeur la plus haute. Une liaison noire indique que le poids associé est positif alors qu'une liaison grise indique que le poids associé est négatif.</i>	74
<i>Figure IV.3 : Régression locale des résultats (ligne bleue) avec l'erreur standard (zone grise) définissant la limite de confiance de la régression (com. pers. Barthélemy 2015).</i>	76
<i>Figure IV.4 : Exemple des carrières de Triffoy et de Royseux en vert hachuré (carte hydrogéologique 48/3-4 Huy – Nandrin).</i>	82
<i>Figure V.1 : Topographie en trois dimensions du domaine modélisé (figure de gauche) et emplacement du cours d'eau, de la carrière et des captages (figure de droite) (Visual Modflow).</i>	91
<i>Figure V.2 : Photo de la fosse de Beumont dans la carrière de Merlemont (sud-ouest de Philippeville).</i>	92
<i>Figure V.3 : Maillage du domaine modélisé en deux et trois dimensions (Visual Modflow).</i>	92
<i>Figure V.4 : Piézométrie initiale de la nappe souterraine pour une roche d'une K de 5.10^{-5} m/s et une recharge de 200 mm. Un potentiel a été imposé à la rivière (+190 m), à l'ouest (+220 m) et à l'est (+195 m).</i>	94
<i>Figure V.5 : Illustration des conditions générales pour des cours d'eau drainant et infiltrant (Winter et al. 1998, modifié).</i>	97
<i>Figure V.6 : Paramètres à introduire pour définir une condition rivière (Visual ModflowFlex 2014, modifié).</i>	98
<i>Figure V.7 : Condition « mur » dans un domaine modélisé en trois dimensions (Visual Modflow).</i>	99
<i>Figure V.8 : Conditions frontières à l'ouest et l'est du domaine modélisé (Visual Modflow).</i>	100
<i>Figure V.9 : Cartes piézométriques suivant les quatre valeurs de conductivité hydraulique de roche définies. PI à la rivière (+190 m) et au plancher de la carrière (+170 m) d'une superficie de 16 ha.</i>	102

Figure V.10 : La variation de la conductivité hydraulique influence l'étendue de la zone d'influence de l'exhaure (Goodwin et al. 2007).	103
Figure V.11 : Evolution des débits exhaures en fonction de la conductivité hydraulique de la roche exploitée et de l'approfondissement du site carrier.	103
Figure V.12 : Cartes piézométriques en fonction de l'approfondissement d'une carrière dont le plancher a une superficie de 16 ha. $K : 5.10^{-4}$ m/s, $R : 270$ mm, PI à la rivière (+190 m).	105
Figure V.13 : La variation de la profondeur de la carrière influence l'étendue de la zone d'influence de l'exhaure (Goodwin et al. 2007).	106
Figure V.14 : Comparaison de la piézométrie de la nappe souterraine dans une formation aquifère en fonction de l'extension d'une carrière (cote du plancher à +170 m) dans un scénario avec un potentiel imposé à la rivière (PI à +190 m) et un scénario avec une condition rivière (CR).	108
Figure V.15 : Valeurs du débit exhauré dans la carrière en fonction de son extension en direction de la rivière pour trois différentes conditions imposées à la rivière.	109
Figure V.16 : Cartes piézométriques en fonction de l'extension de la carrière. $K : 5.10^{-5}$ m/s, $R : 200$ mm, PI à la rivière (+190 m) et au plancher de la carrière (+170 m).	110
Figure V.17 : Evolution du débit de la rivière en fonction de l'approfondissement et de l'extension d'une carrière. PI à la rivière (+190 m) et conductivité hydraulique de la roche $K_3 (5.10^{-5}$ m/s).	111
Figure V.18 : Evolution du débit exhauré en fonction de l'extension de la carrière vers la rivière. PI à la rivière (+190 m) et au plancher de la carrière (+170 m).	112
Figure V.19 : Le rôle des barrières géologiques sur l'étendue de la zone d'influence de l'exhaure (Goodwin et al. 2007).	112
Figure V.20 : Cartes piézométriques de la nappe d'eau souterraine en présence d'une barrière hydrogéologique, en fonction de l'approfondissement du site carrier. $K : 5.10^{-5}$ m/s, $R : 200$ mm, PI à la rivière (+190 m).	113
Figure V.21 : Évolution du débit exhauré dans la carrière en fonction de l'approfondissement de celle-ci (superficie de 16 ha). $K : 5.10^{-5}$ m/s, $R : 200$ mm, PI à la rivière (+190 m).	114
Figure V.22 : Évolution du débit de la rivière en fonction de l'approfondissement d'un site carrier d'une superficie de 16 ha. $K : 5.10^{-5}$ m/s, $R : 200$ mm, PI à la rivière (+190 m).	115
Figure V.23 : Carte piézométrique obtenue pour un scénario d'une carrière ouverte entre deux formations géologiques imperméables. $K : 5.10^{-5}$ m/s, $R : 200$ mm, PI à la rivière (+190 m) et au plancher du site (+170 m).	115
Figure V.24 : Localisation en deux et trois dimensions des captages amont, aval et nord par rapport au site carrier et à la rivière.	116
Figure V.25 : Évolution de la piézométrie au niveau du captage nord suite à l'approfondissement d'une carrière d'une superficie de 16 ha. Q pompé au captage nord : $100 \text{ m}^3/\text{h}$, $K : 5.10^{-5}$ m/s, $R : 200$ mm, PI à la rivière (+190 m).	117
Figure V.26 : Évolution de la piézométrie au niveau des trois captages forés à proximité d'un site carrier d'une superficie de 16 ha. Q pompé aux captages : $100 \text{ m}^3/\text{h}$, $K : 5.10^{-5}$ m/s, $R : 200$ mm, PI à la rivière (+190 m) et au plancher de la carrière (+170 m).	118
Figure V.27 : Carte piézométrique obtenue pour un scénario avec une carrière et un captage implantés de de part et d'autre d'une formation géologique de faible K . Q pompé au captage : $100 \text{ m}^3/\text{h}$, $K : 5.10^{-5}$ m/s, $R : 200$ mm, PI à la rivière (+190 m) et au plancher de la carrière (+170 m).	118

<i>Figure VI.1 : Ensemble des indices d'interaction attribués par chacun des 28 participants aux 26 carrières théoriques. En abscisse chaque combinaison proposée apparaît dans la couleur de l'indice d'interaction attribué par le modèle.</i>	<i>126</i>
<i>Figure VII.1 : Contexte topographique et hydrographique du plateau du Gerny.</i>	<i>130</i>
<i>Figure VII.2 : Contexte géologique et structural de la zone d'étude.</i>	<i>131</i>
<i>Figure VII.3 : Contexte hydrogéologique de la zone d'étude.</i>	<i>132</i>
<i>Figure VII.4 : Cartes piézométriques du plateau du Gerny en périodes de basses eaux (à gauche) et de hautes eaux (à droite)(Bonniver et al. 2012).</i>	<i>139</i>
<i>Figure VII.5 : Allure de la piézométrie en périodes de basses eaux (profil bleu, Novembre 2011) et de hautes eaux (profil rouge, Janvier 2011) dans le Plateau du Gern.</i>	<i>140</i>
<i>Figure VII.6 : Délimitation de la zone modélisée (à gauche) et discrétisation de la zone modélisée à l'échelle régionale (à droite) (Wildemeersch et al. 2012).</i>	<i>142</i>
<i>Figure VII.7 : Input, output et flux des eaux souterraines entre les lentilles calcaires et les formations géologiques limitrophes (Wildemeersch et al. 2012).</i>	<i>141</i>
<i>Figure VII.8 : Rabattement de la nappe sous la carrière (pompage de $\pm 160 \text{ m}^3/\text{h}$) et stabilisation de son niveau pendant l'exploitation du chaque palier (pompage de l'ordre de $117 \text{ m}^3/\text{h}$) (Wildemeersch et al. 2012).</i>	<i>143</i>
<i>Figure VII.9 : Variations du niveau piézométrique de la nappe souterraine au niveau du puits JTR18 suite aux cycles de rabattement/stabilisation de la nappe souterraine par exhaure dans la carrière (Wildemeersch et al. 2012).</i>	<i>144</i>
<i>Figure VII.10 : Localisation du site d'exploitation de dolomie de Marche-les-Dames.</i>	<i>145</i>
<i>Figure VII.11 : Carte géologique de la zone d'étude (Passagez 2012).</i>	<i>146</i>
<i>Figure VII.12 : Carte hydrogéologique de la zone d'étude (Passagez 2012).</i>	<i>146</i>
<i>Figure VII.13 : Localisation des piézomètres et allure de la piézométrie en situation naturelle, c'est-à-dire en absence d'exhaure. (Passagez 2012).</i>	<i>148</i>
<i>Figure VII.14 : Profil du site d'extraction avec les stations de jaugeage de l'Haigneaux (en rose) et le circuit des eaux exhaurées (en rouge) (com. pers. Lhoist 2012).</i>	<i>148</i>
<i>Figure VII.15 : Profil longitudinal Sud-Nord de la piézométrie dans la zone d'étude fin 2011 (Passagez 2012).</i>	<i>149</i>
<i>Figure VII.16 : Évolution des débits d'exhaure mensuels et des fluctuations piézométriques au droit de cinq piézomètres situés en périphérie du site d'extraction.</i>	<i>153</i>
<i>Figure VII.17 : Etendue de la zone modélisée.</i>	<i>154</i>
<i>Figure VII.18 : Situation piézométrique simulée pour l'extension du site à l'horizon 2016.</i>	<i>154</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau III.1 : Classification des 160 sites carriers en activité en Wallonie selon les paramètres spécifiques aux carrières.</i>	46
<i>Tableau III.2 : Classification des 160 sites carriers en activité en Wallonie selon les paramètres spécifiques aux masses d'eau souterraine.</i>	62
<i>Tableau IV.1 : Probabilités de l'indice carrière pour toutes les combinaisons des paramètres.</i>	78
<i>Tableau IV.2 : Probabilités de l'indice masse d'eau souterraine pour toutes les combinaisons des paramètres.</i>	79
<i>Tableau IV.3 : Indice carrière pour les carrières de Triffoy et de Royseux (x).</i>	83
<i>Tableau IV.4 : Indice masse d'eau souterraine pour les carrières de Triffoy et de Royseux (x).</i>	84
<i>Tableau IV.5 : Probabilités d'indice d'interaction pour les carrières de Triffoy et Royseux (x).</i>	85
<i>Tableau IV.6 : Probabilités d'indice d'interaction pour les carrières de Triffoy et Royseux (x).</i>	86
<i>Tableau V.1 : Valeurs de conductivité hydraulique pour chacune des formations hydrogéologiques définies. ...</i>	93
<i>Tableau V.2 : Valeurs de recharge définies pour chacune des unités hydrogéologiques de notre étude.</i>	96
<i>Tableau V.3 : Conductivités hydrauliques des différents types d'alluvions rencontrés.</i>	107
<i>Tableau VI.1 : Association de paramètres de l'indice carrière et l'indice masse d'eau souterraine pour 26 carrières théoriques.</i>	123
<i>Tableau VI.2 : Comparaison des indices d'interaction obtenus à l'aide du modèle avec les indices d'interaction moyens pour l'ensemble des sondés. Indice low = 1, indice medium = 2, indice high = 3, indice very high = 4.</i>	124
<i>Tableau VII.1 : Indice carrière pour la carrière de la Boverie dans l'état actuel d'exploitation (x).</i>	133
<i>Tableau VII.2 : Indice carrière pour la carrière de la Boverie en cas d'approfondissement (x).</i>	133
<i>Tableau VII.3 : Indice masse d'eau souterraine pour la carrière de la Boverie dans l'état actuel d'exploitation (x).</i>	135
<i>Tableau VII.4 : Indice de l'indice carrière pour la carrière de Marche-les-Dames (x).</i>	149
<i>Tableau VII.5 : Indice masse d'eau souterraine pour la carrière de Marche-les-Dames (x).</i>	151

Liste des abréviations

Aquawal : Union professionnelle des opérateurs publics du cycle de l'eau de Wallonie

CILE : Compagnie Intercommunale Liégeoise des Eaux

CWBP : Code Wallon de Bonne Pratique

CWEPSS : Commission Wallonne d'Etude et de Protection des Sites Souterrains

DGO3 ou **DGARNE** : Directive Générale Opérationnelle de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et de l'Environnement

Fediex : Fédération des industries extractives de Belgique

IGN : Institut Géographique National

IRM : Institut Royal Météorologique

ISSEP : Institut Scientifique de Service Public

NaXys : Namur center for compleX systems

RW : Région Wallonne

SEQ-ESO : Système d'Evaluation de la Qualité des Eaux souterraines

SGS : Société Générale de Surveillance

Sethy : Service d'études hydrologiques de la Région wallonne

SPGE : Société Publique de la Gestion de l'Eau

SPW : Service Public de Wallonie

SWDE : Société Wallonne Des Eaux

Liste des unités de mesure

m : mètre

mm : millimètre

km : kilomètre

l : litre

ha : hectare

s : seconde

h : heure

mg : milligramme

Avant-propos

Cette thèse de doctorat constitue le fruit de plusieurs années de recherche qui se sont écoulées de 2011 à 2015.

En 2010, une convention voit le jour au Service Public de Wallonie (SPW) entre l'union des producteurs d'eau potable (Aquawal) et la fédération des carriers (Fediex) dans le but de veiller à une conduite simultanée des deux pôles d'activités et à encourager les synergies entre les opérateurs.

En janvier 2011, le SPW confie au Département de Géologie de l'Université de Namur la tâche de recenser les données relatives au contexte hydrogéologique de l'ensemble des sites carriers actifs en Wallonie. Comme réalisé précédemment par le Professeur Poty (Université de Liège) à partir des données relatives au contexte géologique, nous avons compilé les données hydrogéologiques sous forme de rubriques dans une banque de données FileMaker Pro. Cet inventaire aura pris deux ans.

Pour chaque site carrier, un résumé synthétique reprend son influence potentielle sur les captages d'eau environnants. Il suggère des actions à mettre en place afin de mieux connaître les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques du milieu pour évaluer de manière précise l'interaction entre carrière et captage. Cependant, cette synthèse consiste en une description assez fastidieuse et peu valorisable pratiquement en termes de diagnostic. De là nous vint l'idée de mettre en place un système de classification des sites carriers à partir de six critères hydrogéologiques aisés à définir.

Le SPW, convaincu de l'intérêt de ce système de classification, accepte de confier la tâche au Département de Géologie de l'Université de Namur en Janvier 2013. Cette étude, en continuité avec la précédente, vise donc à évaluer l'impact potentiel des opérations d'exhaure au niveau des sites carriers sur l'environnement hydrogéologique à l'aide d'un indice d'interaction, calculé sur base de critères scientifiques et d'évaluer, suivant la valeur de cet indice, la nécessité de préciser le contexte hydrogéologique à l'aide d'investigations plus ou moins détaillées. L'ampleur exacte de l'interaction est déterminée et les mesures nécessaires pour assurer aux producteurs d'eau une eau souterraine en quantité suffisante et de qualité peuvent ainsi être apportées. Ce travail aura pris un an et demi.

La qualité des résultats obtenus a été démontrée mathématiquement par nos collègues mathématiciens de l'Université de Namur. En Septembre 2014, une bourse de recherche FSR nous a permis de finaliser l'étude, notamment en réalisant une modélisation mathématique à l'aide du logiciel Modflow. Celle-ci a eu pour objectif de vérifier le bien-fondé des paramètres hydrogéologiques de notre indice d'interaction. Ensuite, un sondage d'opinion a été entrepris auprès de la communauté scientifique belge afin de confronter nos résultats.

Le calcul de l'indice d'interaction se veut un outil de décision, permettant de définir de manière objective, à partir de critères hydrogéologiques simples, la complexité des études à réaliser pour caractériser chaque site carrier à différents stades de son exploitation.

Summary

Calculation of an interaction index between extractive activity and groundwater abstraction.

There are two underground resources intensively exploited in Wallonia, the southern region of Belgium : groundwater and rock. 80,3% of the groundwater abstractions are for the production of drinking water and 80,8% of the materials extracted in the quarries are carbonate rocks, corresponding to hydrogeological formations with high values of hydraulic conductivity as well as of water storage capacity.

Given the high population density and environmental pressures, the quarry operator is often required to prefer the deepening of the exploitation rather than a lateral extension. In this context, the saturated zone of the exploited formation is sometimes reached, which inevitably leads to the filling of the quarry pit bottom by groundwater. The water hydraulic heads have to be decreased by pumping, so the extractive activity can continue, creating a cone of depression. The impact on the hydrological regime, and therefore on the surface waters as well as on the productivity of supply wells, could be significant.

In order to assess and manage the interaction between extractive activity and groundwater abstraction, by avoiding significant additional costs, an interaction index method was developed. It is a decision support tool for the feasibility study of the extractive activity. Its advantage is the easy contextualization of the site by clearly synthesizing the existing information.

The interaction index is based on the following equation : $\text{Interaction} = F(\text{Quarry}, \text{Water body})$. The “quarry index” is characterized by three parameters, the “water body index” by three other parameters. Each of them is divided into four categories. A quarry fits with a combination of these categories depending on its current state. This state can vary over time, as will the interaction index.

The parameters chosen to represent the “quarry index” are : the geological context, the hydrogeological context and the hydraulic head context. The parameters chosen to represent the “water body index” are : the relative position of the quarry and the pumping wells, the productivity of the pumping wells and the potential quality of the groundwater. In order to correlate and properly weight these parameters in the equation, a discrete choice model and an artificial neuronal network have been used.

Depending on the result of the equation obtained, the quarry will present a low, a medium, a high, or a very high interaction index. This will determine the level of investigation of the impact study, namely a geological and hydrogeological local detailed analysis, a continuous hydraulic head monitoring, and the development of a steady or transient state groundwater mathematical modeling study.

Résumé

Définition d'un indice d'interaction entre l'activité extractive et l'exploitation des eaux souterraines.

Il existe deux ressources souterraines importantes en Wallonie : l'eau et la roche. 80,3% des eaux souterraines pompées sont destinées à la production d'eau potable et 80,8% des matériaux extraits dans les carrières sont constitués de roches carbonatées, correspondant à des formations dont la conductivité hydraulique et le coefficient d'emménagement sont généralement élevés.

Vu la densité de population importante et les fortes pressions environnementales, l'extension spatiale des carrières est de plus en plus limitée. L'exploitant est souvent amené à privilégier l'approfondissement, pour autant que la structure du gisement le permette. Dans ce contexte, la zone saturée de la formation exploitée est finalement atteinte, ce qui mène inévitablement au remplissage du fond de fosse par de l'eau souterraine. La nappe doit alors être artificiellement rabattue afin que l'activité extractive puisse perdurer, entraînant ainsi la mise en place d'un cône de rabattement. L'impact sur le régime hydrogéologique, et dès lors sur l'hydrologie et la productivité des captages pour la distribution publique d'eau potable implantés à proximité, peut s'avérer important.

Dans le but d'évaluer et gérer l'interaction entre l'activité extractive et les ressources en eau souterraine, en évitant des dépenses supplémentaires pouvant émerger suite à une prise en considération tardive, un indice mathématique a été développé. Il s'agit d'un outil d'aide à la décision pour orienter l'étude de faisabilité. Son avantage consiste en une contextualisation aisée du site d'étude, en synthétisant clairement les informations existantes.

L'indice d'interaction se base sur l'équation : Interaction = F (Carrière, Masse d'eau souterraine). L'« indice carrière » est représenté par trois paramètres, l'« indice masse d'eau souterraine » par trois autres. Chacun est divisé en quatre catégories. Une carrière correspond à une combinaison de ces catégories en fonction de son état actuel. Puisque cet état peut varier au cours du temps, l'indice d'interaction variera dès lors en fonction de l'évolution de ces paramètres.

Les paramètres choisis pour l'indice carrière sont le contexte géologique, le contexte hydrogéologique et le contexte piézométrique. Les paramètres choisis pour l'indice masse d'eau souterraine sont la position relative de la carrière et des captages pour la production publique d'eau potable, ainsi que la qualité potentielle de l'eau souterraine. Afin de corréler et pondérer correctement ces paramètres dans l'équation, un modèle de choix discrets et un réseau de neurones artificiels ont été utilisés.

En fonction du résultat de l'équation obtenu, la carrière présentera un indice d'interaction soit faible, moyen, fort ou très fort. Celui-ci déterminera le degré d'investigation de l'étude d'incidence, qui peut être respectivement une contextualisation géologique et hydrogéologique, un suivi piézométrique continu, une modélisation mathématique en régime permanent et une modélisation mathématique en régime transitoire.

I INTRODUCTION

I.1 CONTEXTE GÉNÉRAL

Il existe deux ressources souterraines importantes en Wallonie :

- l'**eau souterraine**, ressource dont la recharge moyenne annuelle (1995-2010) est de l'ordre de 1895 millions de m³ (*Bonniver et Hallet 2013*) et exploitée avec un volume de 380,4 millions de m³ (en 2010) ;
- la **roche** dont la production moyenne annuelle (2002-2009) s'élève à plus de 73 millions de tonnes¹.

I.1.1 Ressources en eau

La Région wallonne dispose d'un capital important en eau souterraine grâce d'une part, à un régime de précipitations abondant et régulier et d'autre part, à des lithologies particulièrement favorables à la mise en place de nappes aquifères (*Dassargues et Walraevens 2014*). Les eaux souterraines étant en général de meilleure qualité que les eaux de surface, l'essentiel des prélèvements est destiné à la production d'eau potable (305,5 millions de m³ en 2010)². Les prélèvements d'eau destinés à la distribution publique sont relativement constants d'année en année.

Par ailleurs, les eaux souterraines jouent un rôle essentiel dans le soutien des débits des cours d'eau en période d'étiage. Elles participent ainsi directement à l'équilibre hydrique des écosystèmes aquatiques et des zones humides, contribuant de la sorte au maintien de leur biodiversité (*Brahy et al. 2006 ; Gailliez 2013*).

Toutes les masses d'eau souterraine wallonnes sont mises à contribution même si les potentialités d'exploitation varient fortement de l'une à l'autre, principalement en fonction de la géologie, laquelle détermine leurs propriétés hydrogéologiques.

Les huit masses d'eau principalement sollicitées en Wallonie sont (*Figure I.1*) :

- les craies du bassin de Mons (RWE030) ;
- les sables bruxelliens (RWE051) ;
- les calcaires carbonifères du Tournaisis (RWE060) ;
- les calcaires du bord Nord du bassin de la Meuse (RWM011) ;
- les calcaires carbonifères du bassin de Dinant (RWM021) ;
- les craies de Hesbaye (RWM040) ;
- les formations jurassiques du Sud Luxembourg (RWM092) ;
- et plus localement, le Massif schisto-gréseux de l'Ardenne (RWE100).

¹ www.fediex.be

² <http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas>

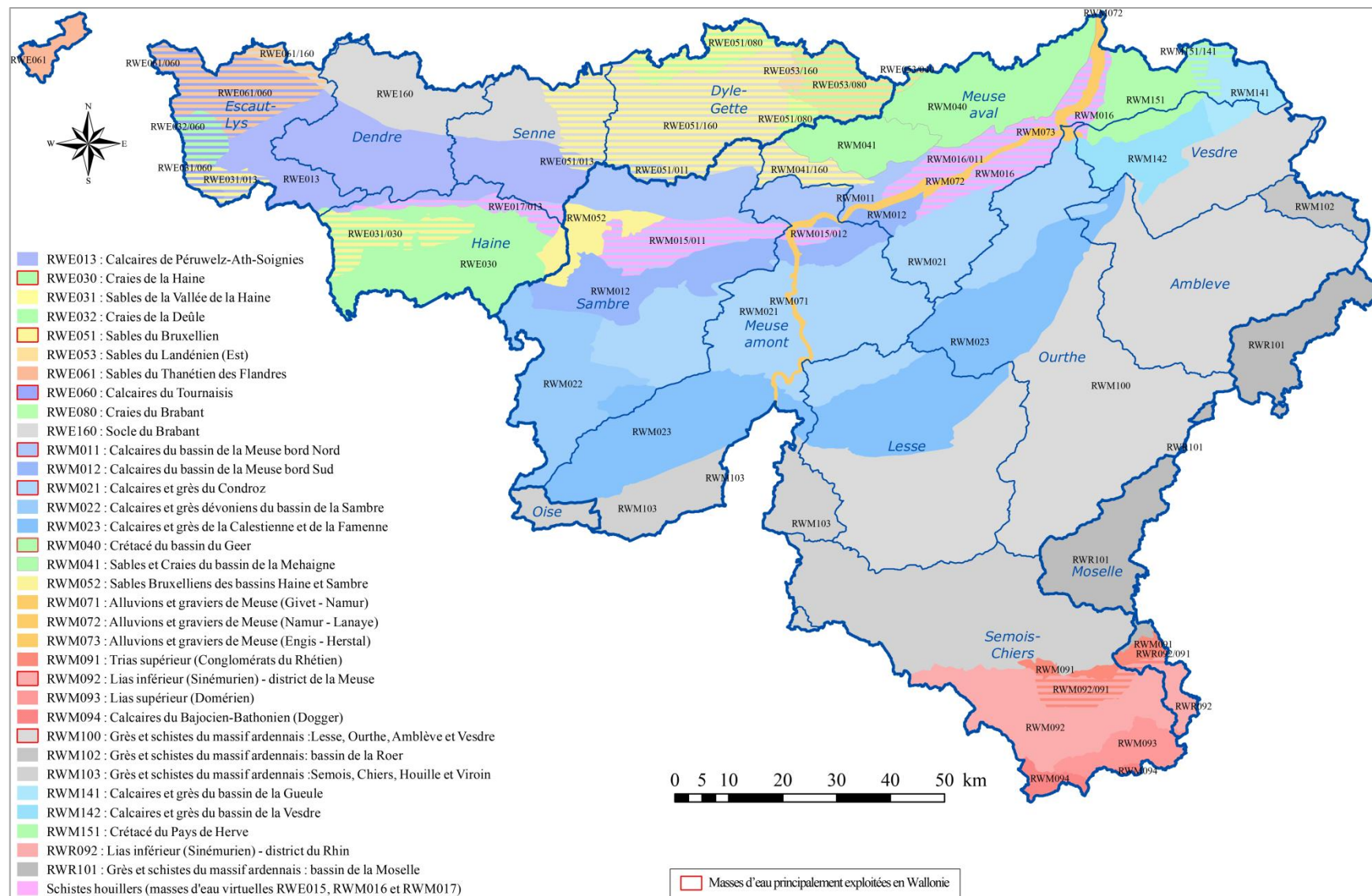


Figure I.1 : Carte des masses d'eau souterraine de Wallonie (<http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas>).

Les formations calcaires fournissent annuellement plus de la moitié des volumes prélevés (193,3 millions de m³) et les craies près d'un quart (79,7 millions de m³)³ (Figure I.2).

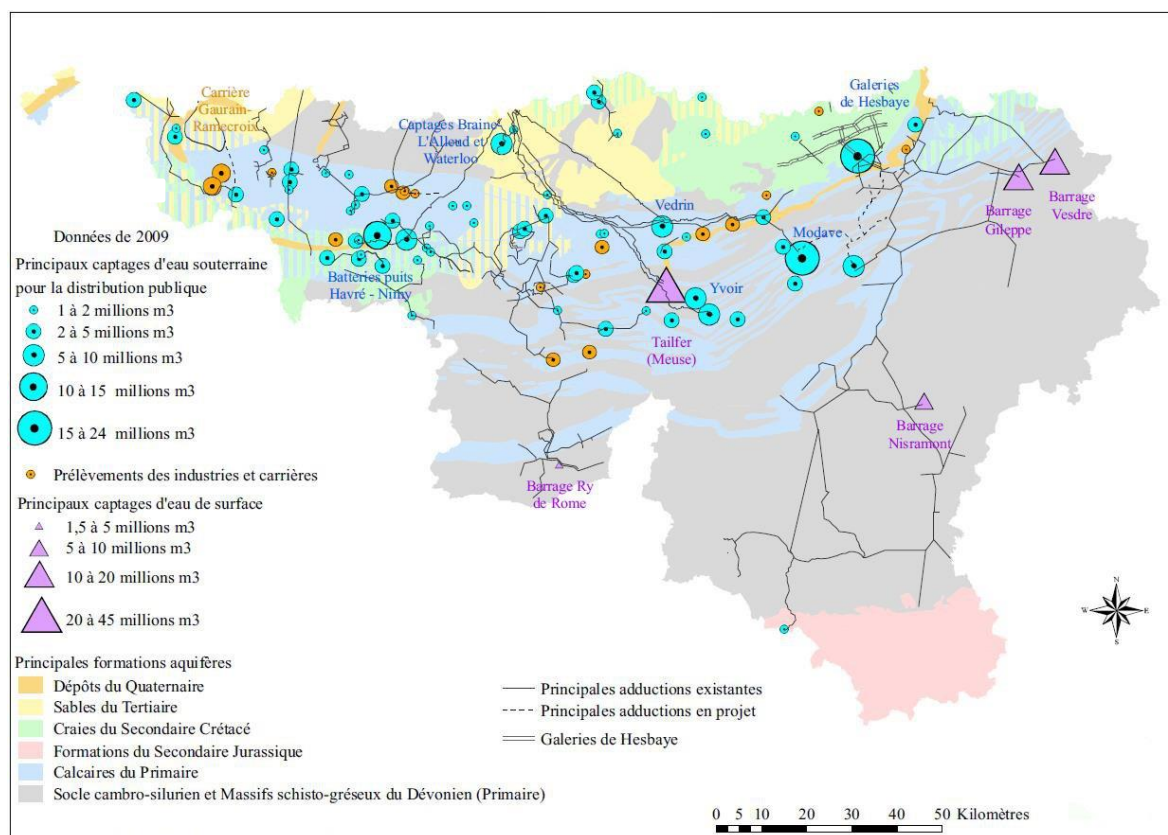


Figure I.2 : Localisation des principales prises d'eau en Région wallonne³.

Les prises d'eau souterraine ainsi que les zones de prise d'eau, de prévention et de surveillance et la recharge artificielle des nappes d'eau souterraine sont régies par le Code de l'eau (*arrêté gouvernemental wallon du 14 novembre 1991*). La Société Publique de la Gestion de l'Eau (SPGE) assure la gestion financière des dossiers concernant la protection des eaux potabilisables distribuées par réseaux par le biais de contrats de service passés avec les producteurs d'eau.

I.1.2 Ressources en roches

Malgré un territoire relativement modeste, la Région wallonne possède une richesse géologique très importante de par la quantité et la diversité de ses roches (Figure I.3). Celles-ci sont exploitées depuis l'Antiquité. L'activité extractive wallonne mobilise une superficie totale évaluée à environ 14 750 ha (superficie des zones d'extraction au plan de secteur), soit 0,9% du territoire wallon.

³ <http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas>

Il existe 229 sites carriers ouverts en Wallonie (*Poty et al. 2002*), dont certains sont à l'abandon. Actuellement 160 sont encore en activité, dont 38 sont exploités par intermittence.

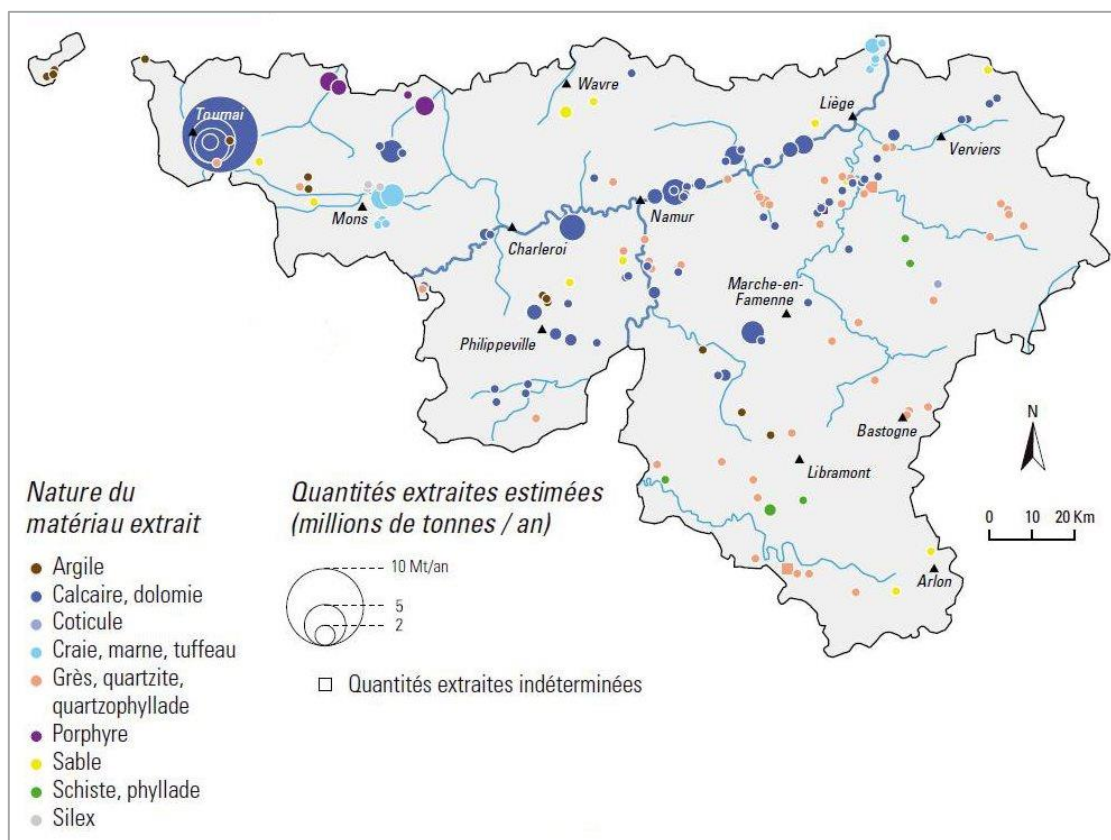


Figure I.3 : Localisation de l'activité extractive en Wallonie⁴.

Sur les 160 sites en activité (*Figure I.4*) :

- 92 exploitent des roches carbonatées (calcaire, dolomie, marbre, craie) ;
- 47 exploitent des roches détritiques (schiste, phyllade, quartzophyllade, quartzite, arkose) ;
- 2 exploitent du silex ;
- 4 exploitent du porphyre ;
- 6 exploitent des sables ;
- et 9 exploitent des argiles.

⁴ <http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas>

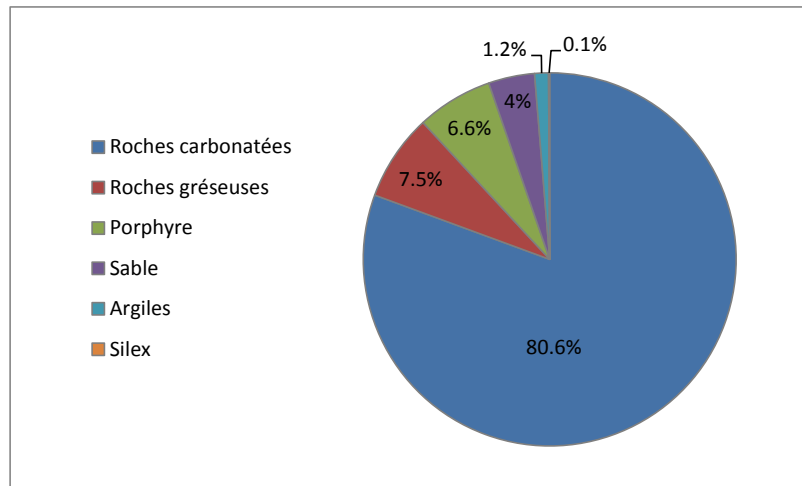


Figure I.4 : Répartition des 160 carrières wallonnes selon la nature de la roche exploitée.

En termes de tonnage, la production moyenne annuelle de roches ($\pm 73.10^6$ tonnes, Poty et al. 2002) est essentiellement constituée de (Figure I.5) :

- roches carbonatées : 49,1 millions de tonnes de calcaire et de dolomie et 7,8 millions de tonnes de craies par an ;
- roches détritiques : 5,3 millions de tonnes par an ;
- porphyre : 5,2 millions de tonnes par an ;
- sable : 1,7 millions de tonnes par an ;
- argiles : 0,7 millions de tonnes par an.

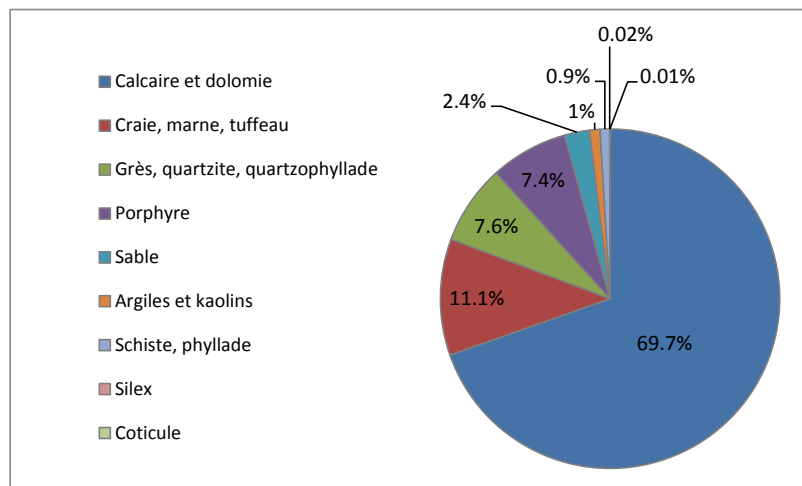


Figure I.5 : Répartition de la production moyenne annuelle de roches selon la nature des matériaux exploités.

Si l'on considère la production moyenne annuelle au niveau de la formation hydrogéologique (Collier et Hallet 2013) (Figure I.6) :

- 80,8% correspondent à des roches issues de formations aquifères des calcaires du Paléozoïque ;
- 10% correspondent à des roches issues de formations aquifères crayeuses ;
- 7,2% correspondent à des roches issues de formations aquitards ;
- et les 2% restant correspondent à des roches issues de formations aquicludes.

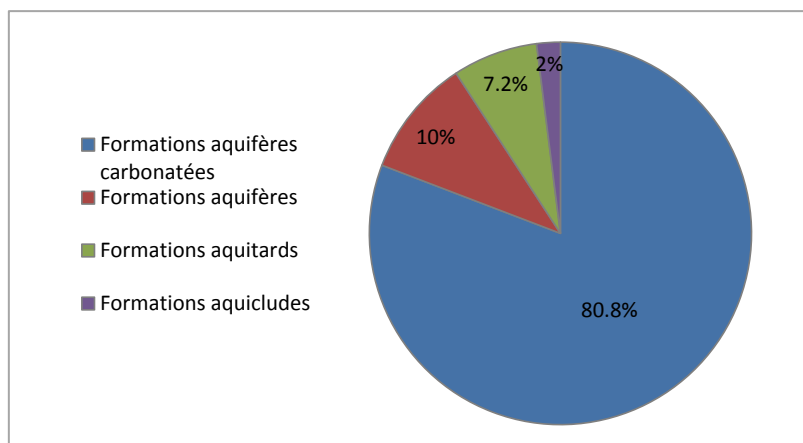


Figure 1.6 : Répartition de la production moyenne annuelle de roches selon la nature des formations hydrogéologiques concernées.

I.1.3 Interaction lors de l'exploitation des deux ressources

L'activité extractive est réglementée par le *code de l'Environnement* (2004)⁵. Une autorisation administrative est nécessaire pour ouvrir une nouvelle carrière, renouveler une autorisation ou étendre le périmètre d'exploitation d'une carrière. De plus, depuis le *décret du 10 novembre 2006*, une étude d'incidences peut être imposée par l'autorité si le projet est susceptible d'avoir une influence notable sur l'environnement.

D'une façon générale pour les projets privés ou publics, l'évaluation des incidences sur l'environnement requiert d'identifier, de décrire et d'évaluer les effets directs et indirects du projet à court, à moyen et à long terme. Cette évaluation prend en compte de nombreuses composantes telles que l'homme, la faune, la flore, le sol, l'eau, l'air, le climat et le paysage⁶.

Vu la densité de population élevée et les fortes pressions environnementales, l'extension spatiale des carrières est de plus en plus limitée. L'exploitant est souvent amené à privilégier l'approfondissement, pour autant que la structure du gisement le permette. C'est notamment le cas de nombreuses carrières dans la région de Tournai (*Figure 1.7*).

Dans ce contexte, la zone saturée de la formation exploitée finit par être atteinte, ce qui entraîne inévitablement le remplissage du fond de la fosse par de l'eau souterraine. Dès lors, la nappe aquifère doit être artificiellement rabattue par **exhaure** pour que l'activité extractive puisse perdurer.

Une **eau d'exhaure** est définie comme « une eau constituée par les eaux de pluie qui ruissellent sur les parois de la carrière et surtout par les eaux souterraines, provenant de la nappe lorsque l'exploitation de la carrière descend sous le niveau de la nappe. Elles sont évacuées par un moyen technique adéquat, afin de permettre l'exploitation de la carrière à sec »⁷.

⁵ <http://environnement.wallonie.be/legis/menucode.htm>

⁶ <http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas>

⁷ <http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas>



Figure I.7 : Sites carriers exploités entre Tournai et Antoing (Google Earth).

En Wallonie, 61 des 160 sites carriers en activité, c'est-à-dire plus d'un tiers, réalisaient de l'exhaure en 2011 (Figure I.8). Les volumes pompés en Wallonie sont donc considérables. Ils atteignaient plus de 39,31 millions de m³ en 2011, plus de 36,61 millions en 2012 et plus de 35,74 millions en 2013 (*com. pers. Willame 2015*). Ces variations d'une année à l'autre sont entre autre dues au fait que certains sites exploités il y a quelques années ont arrêté leur activité (exemple de la carrière CCB à Gaurain-Ramecroix) ou inversement, des sites dont l'exhaure n'était pas encore effective il y a quelques années présentent aujourd'hui une exhaure en augmentation continue (exemple de la carrière du Fonds des Vaulx à Wellin).

Dès lors, les conséquences sur le régime hydrogéologique, et donc sur le régime hydrologique des rivières, peuvent s'avérer importantes. En effet, en Wallonie, 80,6% de la production des matériaux extraits correspondent à des roches issues de formations aquifères, présentant de fortes conductivités hydrauliques et un coefficient d'emmagasinement d'eau élevé (*Collier et Hallet 2013*).

De manière générale, quelle que soit la méthode utilisée (puisard en fond de fosse, drains, captages périphériques, tranchées), l'effet est le même et se manifeste sous la forme d'un **cône de rabattement** de la nappe, centré sur l'excavation (Figure I.9). Dès lors, une série d'impacts environnementaux directs, c'est-à-dire portant sur l'hydrogéologie, ou indirects, c'est-à-dire se manifestant en surface, sur la géomorphologie notamment, sont observés (*Environment Agency 2007*). Ils dépendront de l'importance du rabattement et de son extension radiale, ainsi que de la sensibilité des écosystèmes associés aux eaux souterraines.

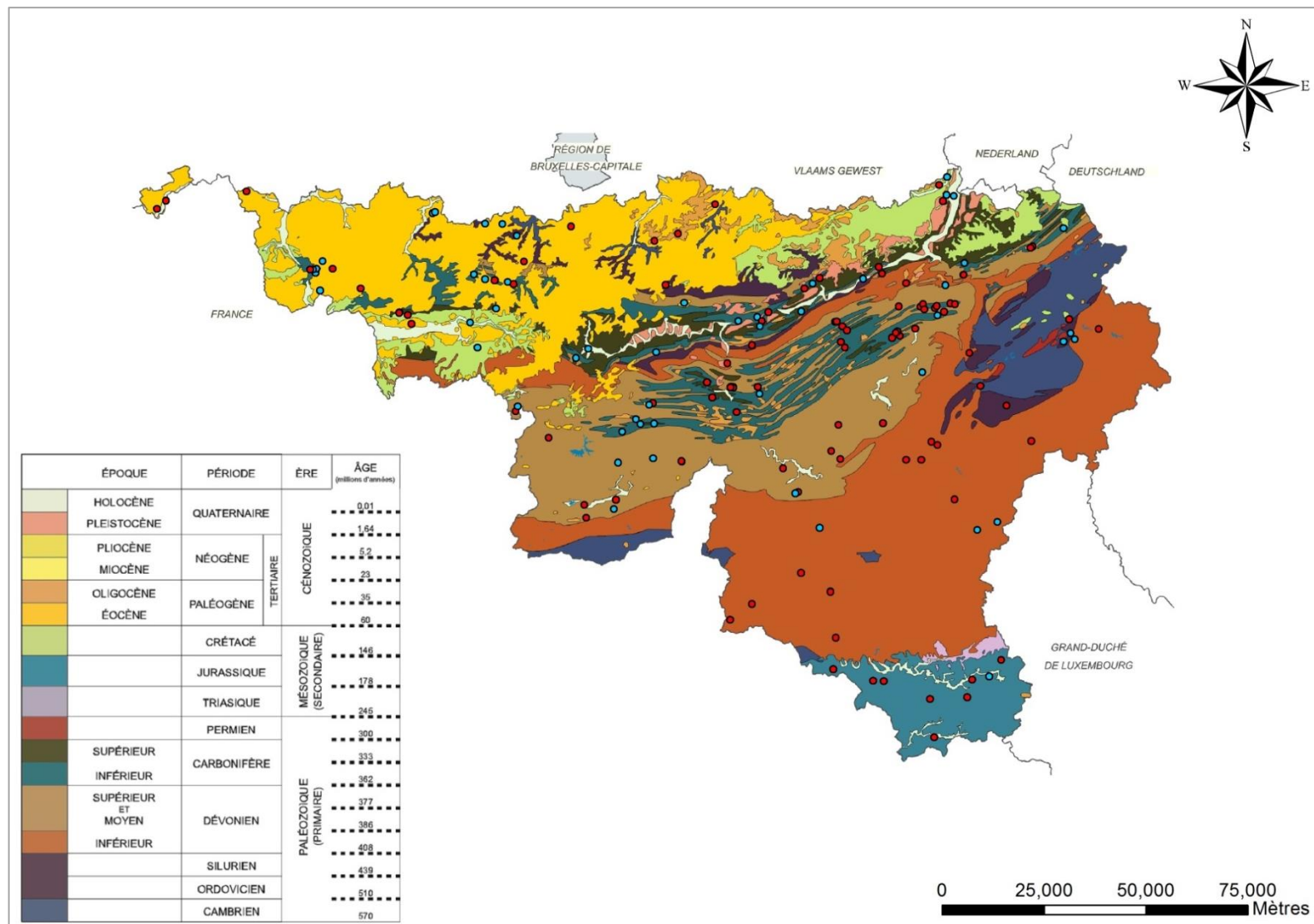


Figure I.8 : Localisation des carrières réalisant de l'exhaure (pastilles bleues) et celles n'en réalisant pas (pastilles rouges) en Wallonie (Service Géologique de Wallonie).

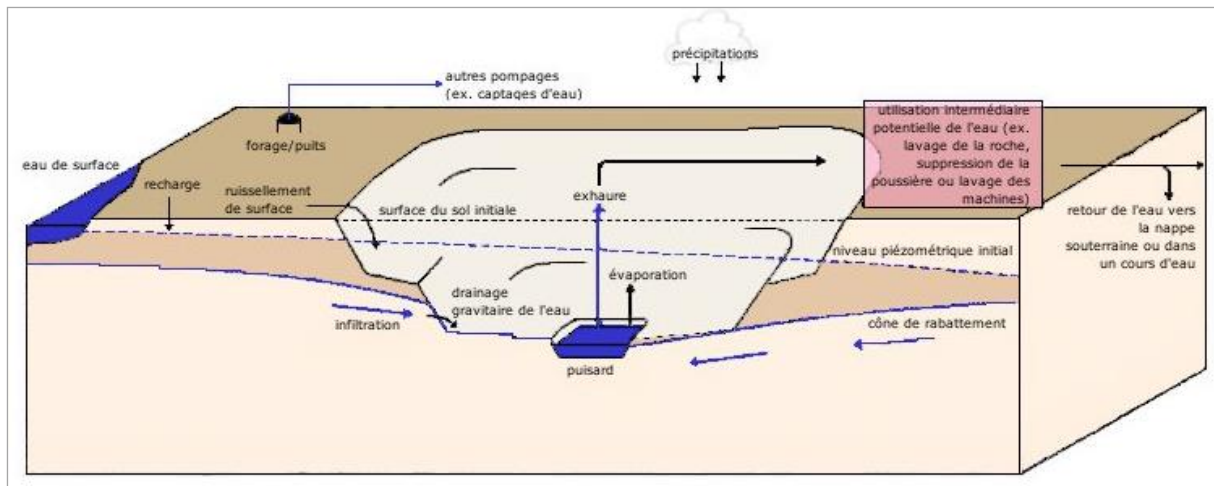


Figure I.9 : Schéma d'exhaure dans une carrière suite à l'approfondissement du fond de fosse sous le niveau piézométrique de la nappe souterraine (Goodwin et al. 2007, modifié).

De manière plus précise, on observe :

- les **impacts directs** : suivant le contexte hydrogéologique, l'impact se traduit par une diminution du niveau piézométrique de la nappe souterraine, entraînant une variation de la transmissivité de la formation hydrogéologique concernée, un changement de direction des flux d'eau, pouvant causer une éventuelle intrusion d'eau de composition différente en provenance d'une source extérieure (telle que le réseau hydrographique), une diminution du rendement spécifique des puits environnants, ou encore une diminution du débit des sources et des cours d'eau, des lacs, des zones humides, etc.

Lorsque la mise en place d'un cône de rabattement de la nappe sous un site carrier affecte la productivité d'un captage pour la distribution publique d'eau potable, le carrier et le producteur d'eau doivent examiner ensemble toute mesure alternative pour garantir l'accès à l'eau.

- les **impacts indirects** : en cas de rabattement important et prolongé, des impacts morphologiques et géotectoniques peuvent se manifester par tassement suite à la désaturation des terrains, par subsidence locale du sol, ou encore apparaître sous forme de dolines et d'avens, suite au lessivage de poches d'altération de formations carbonatées peu profondes.

Généralement, les eaux souterraines pompées par exhaure sont rejetées en grande partie dans le réseau hydrographique, après une éventuelle utilisation partielle pour les besoins industriels (arrosage des pistes, lavage des engins, etc.). Les conditions de rejet d'eaux dans le réseau hydrographique sont fixées, en quantité et en qualité, par le permis d'exploitation.

Le carrier paie des taxes et/ou redevances pour les prélèvements en eau de surface, pour le pompage d'eaux souterraines (puits ou exhaure) ainsi que pour leurs rejets dans les eaux de surface. Depuis le 12 décembre 2014, les prises d'eau d'exhaure sont soumises annuellement à une contribution de prélèvement fixée à 0,0756 euros par m³ d'eau d'exhaure portant sur les volumes d'eau souterraine. Pour les volumes prélevés en 2011, la contribution de prélèvement totale due par le secteur carrier s'élevait ainsi à 2,9 millions d'euros.

Un moyen pour les carriers de remédier au déséquilibre qu'ils provoquent sur les nappes souterraines est de valoriser les eaux pompées en s'associant avec les distributeurs d'eau captant à proximité ou de réalimenter la nappe en injectant les eaux d'exhaure dans le sol. En outre, le budget général de dépenses de la Région wallonne permet depuis 2013 (*Article 44* du décret sur le budget général des dépenses de la Région wallonne) des subventions aux organismes publics et assimilés pour financer des projets de valorisation de l'eau d'exhaure de carrières pour la distribution publique (*Programme 15.13* de la Région wallonne sur la prévention et la protection de l'air, l'eau et le sol).

I.1.4 Signature d'une charte de concertation

En octobre 2012, une charte de concertation a été signée par le secteur de la production d'eau (Aquawal) et le secteur carrier (Fediex et Pierres et Marbres de Wallonie) afin d'assurer une cohabitation harmonieuse entre ces deux pôles d'activité essentiels pour le devenir de la Wallonie. Cet engagement a pour objectif de favoriser la conduite simultanée des activités de production d'eau et des activités extractives, de la conception à la fin de l'exploitation. Dès lors, les deux secteurs étudieront l'impact potentiel entre leurs activités respectives. Suivant l'estimation de ces impacts, la charte prévoit notamment la réalisation d'études hydrogéologiques.

Pour rappel, les différents partis concernés sont :

- **Aquawal** : Union professionnelle des opérateurs publics du cycle de l'eau regroupant les principaux producteurs et distributeurs d'eau potable, l'ensemble des organismes d'assainissement agréés de la Région wallonne, ainsi que la SPGE.
- La **Fediex** : Fédération des industries extractives de Belgique. La grande majorité de ses membres, du fait de la géologie du pays, est située en Région wallonne.
- **Pierres et Marbres de Wallonie** : ASBL qui fournit une information de qualité sur la pierre et ses applications auprès du grand public, des architectes, des entrepreneurs et des autorités publiques. La plupart des carrières de pierres ornementales en sont membres.

I.2 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

La présente étude a été réalisée dans le cadre de la convention qui contribue aux objectifs fixés par la *Directive cadre 2000/60/CE* établissant un environnement pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau (*Directive cadre Eau*) afin d'assurer que tous les acteurs disposent d'une eau de qualité en quantité suffisante pour leurs usages respectifs. Elle s'intègre dans la mise en place d'un schéma directeur de l'exploitation des ressources en eau à l'échelle régionale dont la réalisation a été confiée par le Gouvernement wallon à la SWDE (Société Wallonne des Eaux) et qui vise notamment à encourager les synergies entre opérateurs.

En 2011, le SPW (Service Public de Wallonie) a confié la tâche au Département de Géologie de l'Université de Namur de recenser les données relatives au contexte

hydrogéologique local (voire régional) de l'ensemble des carrières en activité en Wallonie. Comme réalisé précédemment par le Professeur E. Poty (Université de Liège) avec les données relatives au contexte géologique, les données hydrogéologiques ont été compilées dans une banque de données FileMaker Pro.

Le premier objectif de ce travail était donc de couvrir sur base des données existantes et disponibles les points suivants :

- la reprise des données cartographiées des études du Professeur E. Poty sur les carrières en activité et leurs projets d'extension ;
- la synthèse cartographique des ressources en eau souterraine de Wallonie pour les aquifères concernés par l'activité extractive ;
- la localisation des carrières et des captages actuels et futurs (s'ils sont connus), dans le contexte hydrogéologique régional et local ;
- l'analyse de l'impact global de chaque site carrier sur les captages et ressources en eau souterraine, dans l'état actuel et futur ;
- l'analyse de l'impact global actuel des captages sur les carrières dans leur état existant ou futur ;
- dans le cas d'interactions réelles ou éventuelles, l'établissement d'un diagnostic général expliquant clairement la problématique régionale et locale.

La synthèse rédigée pour chaque site carrier reprend le degré d'influence potentielle du site carrier sur les captages d'eau environnants et suggère des actions à mettre en place afin de mieux connaître les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques du milieu, et ainsi d'évaluer l'interaction entre les carrières et les captages.

Cependant, cette synthèse hydrogéologique consistait au final en une description assez fastidieuse et peu valorisable pratiquement en termes de diagnostic. Dès lors, le deuxième objectif de ce travail a été de mettre en place un système de classification des sites carriers.

I.3 OBJECTIFS DE LA THÈSE

Dans cette optique, le SPW a engagé en 2013 le Département de Géologie de l'Université de Namur pour réaliser une seconde étude en continuité avec la précédente qui vise à :

- mettre au point une méthodologie et un outil permettant de mettre en évidence l'interaction éventuelle entre l'activité extractive et les captages pour la distribution publique. Un **indice d'interaction** est ainsi calculé sur base de critères scientifiques (des paramètres hydrogéologiques). En d'autres mots, il s'agit d'évaluer l'impact potentiel des opérations d'exhaure au niveau des sites carriers sur les captages et ce en fonction de l'environnement hydrogéologique ;
- et évaluer, suivant la valeur de cet indice, la nécessité de préciser le contexte hydrogéologique à l'aide d'**investigations plus ou moins approfondies** sur le terrain et en laboratoire, afin de déterminer l'ampleur exacte de l'interaction et d'apporter les mesures nécessaires pour assurer aux producteurs d'eau une eau souterraine en quantité suffisante et

de qualité, de manière à garantir leur production et à préserver l'environnement. Il ne s'agit cependant que d'une première estimation visant à lever les éventuelles incertitudes.

Notre thèse de doctorat couvre donc la phase de recensement des données hydrogéologiques pour les sites carriers wallons, la phase de réalisation d'un indice d'interaction et d'une échelle d'investigations applicables sur tout site carrier en activité (wallon ou étranger) ainsi qu'une phase de modélisation mathématique dans laquelle sont illustrés théoriquement les différents scénarios d'exploitation et d'exhaure pouvant être rencontrés.

II RECENSEMENT DES DONNÉES

Cette partie de la thèse s'inscrit dans la suite logique de l'étude intitulée « *L'activité extractive en Wallonie, situation actuelle et perspectives* », réalisée en 2002 (Poty et al.) et mise à jour par C. Bertola en 2010. Cette étude a consisté en un inventaire des carrières en Région wallonne. Elle détaille la variété des roches exploitables et les applications de ces matériaux dans divers secteurs économiques. Elle a eu pour objectif de mettre à disposition des décideurs politiques et administratifs les informations portant sur les caractéristiques techniques et les enjeux économiques de l'exploitation des carrières en Région wallonne. Le contenu de l'étude est également intéressant pour les exploitants des carrières, les architectes, les universités, les bureaux agréés pour la réalisation des études d'incidences sur l'environnement, etc.

Dans la continuité, notre travail a consisté à reprendre les caractéristiques hydrogéologiques de la totalité des carrières en activité en Région wallonne. Toutes les carrières sont reprises sous forme de fiches (*Annexe 1*) dans une base de données réalisée avec le logiciel FileMaker Pro. Leurs caractéristiques figurent sous forme de rubriques. Elles proviennent de plusieurs sources telles que Google Earth, les cartes topographiques de l'Institut Géographique National (IGN), les cartes géologiques de Wallonie, les cartes hydrogéologiques de Wallonie, les banques de données du SPW (« *Dix-Sous* » et *BD-Hydro*) et également l'étude géologique du Professeur E. Poty (2004).

La carrière d'Engis, exploitée en bord de Meuse par le Groupe Carmeuse, est reprise en annexe à titre d'exemple (*Annexe 2*).

II.1 OBSERVATIONS SATELLITAIRES

Une première analyse sur Google Earth permet de replacer la carrière dans son contexte géographique et géomorphologique. Elle permet de déterminer l'occupation du sol aux alentours du site : routes, zones rurales, zones agricoles, zones forestières, réseau hydrographique, qui vont représenter des contraintes pour l'extension du site, mais également des éléments sur lesquels l'exploitation pourrait avoir un impact. De plus, l'image aérienne permet déjà d'observer une éventuelle accumulation d'eau (souterraine ou météorique) en fond de fosse.

II.2 VISITE DU SITE ET OBSERVATIONS SUR LE TERRAIN

Un contact avec le carrier permet de connaître la production moyenne annuelle, la cote altimétrique du plancher de la carrière, et une visite sur le terrain donne la possibilité d'observer l'évolution de l'exploitation, de confirmer les hypothèses émises sur l'hydrogéologie locale (infiltration au droit du site, présence d'eau souterraine ou uniquement de ruissellement en fond de fosse, assèchement de cours d'eau,...) et de prendre des mesures piézométriques.

Remarquons que, malgré ces visites et prises de contact, il n'a pas toujours été possible d'obtenir une cote topographique précise du fond de fosse et que des piézomètres ne sont pas toujours localisés à proximité des carrières.

II.3 ANALYSE DE LA CARTE TOPOGRAPHIQUE

Une étude de la carte topographique de l'IGN permet de comprendre le relief (vallée, plateau), de caractériser et positionner le réseau hydrographique vis-à-vis de la carrière (distance au site, cote altimétrique du thalweg, sens d'écoulement) et également de répertorier les éventuelles sources et pompes présents à proximité de celle-ci.

Une analyse des réseaux hydrographiques de la Région wallonne fournit une information sur l'importance de chaque cours d'eau (Réseau de mesure limnimétrique de la Direction des Cours d'Eau non navigables (Aqualim) et Service d'études hydrologiques de la Région wallonne (Sethy)). Selon la loi relative aux cours d'eau non navigables, ils sont classés en trois catégories :

- première catégorie : les parties des cours d'eau non navigables en aval du point où leur bassin hydrographique atteint au moins 5000 ha ;
- deuxième catégorie : les cours d'eau non navigables ou partie de ceux-ci qui ne sont classés ni en première, ni en troisième catégorie ;
- troisième catégorie : les cours d'eau non navigables ou partie de ceux-ci, en aval de leur origine, tant qu'ils n'ont pas atteint la limite de la commune où est située cette origine.

Les stations météorologiques de l'Institut Royal Météorologique (IRM) ou du Sethy les plus proches du site sont également répertoriées. Cette information peut en effet être intéressante si une étude hydrogéologique plus pointue de la zone étudiée doit être réalisée. Elle fournit des données telles que les précipitations et les températures journalières, nécessaires pour l'établissement d'un bilan hydrogéologique.

II.4 ANALYSE DE LA CARTE GÉOLOGIQUE

L'analyse de la carte géologique permet d'identifier le type de roche exploitée au droit du site et des différentes formations géologiques présentes. D'une part, celles qui sont exploitées et d'autre part, celles qui les bordent et qui peuvent faire office de barrière hydrogéologique de par leur nature lithologique. Elle permet également de connaître l'étage stratigraphique, la géologie structurale et de déduire la direction d'écoulement des eaux souterraines en fonction de la structure, de l'orientation des bancs et/ou de la géomorphologie.

II.5 ANALYSE DE LA CARTE HYDROGÉOLOGIQUE

Une analyse de la carte hydrogéologique offre le moyen de prendre connaissance du bassin hydrogéologique au droit duquel se trouve le site étudié, du sous bassin hydrogéologique, de la masse d'eau souterraine, des différentes unités hydrogéologiques concernées par l'exploitation, de leurs extensions longitudinale et transversale, de la cote piézométrique de la nappe en équilibre sans exhaure, du type de nappe sollicitée (libre, captive, semi-captive),

ainsi que des phénomènes karstiques ponctuels, des écoulements karstiques reconnus par traçage, et des zones de prévention et de surveillance théoriques ou arrêtées des captages présents à proximité de la carrière. La présence de pertes et de résurgences indique si les cours d'eau sont naturellement drainants, infiltrants ou en pseudo-équilibre.

II.6 CONSULTATION DES BANQUES DE DONNÉES « DIX-SOUS » ET BD-HYDRO

Une approche géocentrique, centrée sur la carrière étudiée et de rayon variable (fonction de la nature et de l'extension des formations hydrogéologiques), est réalisée pour déterminer les prises d'eau, issues de la banque de données Dix-Sous⁸, présentes dans un périmètre précis autour du site. Y sont repris les captages pour la distribution publique d'eau potable (puits, galeries, sources à l'émergence), les puits privés, les pompes d'exhaure, les piézomètres, les analyses hydrochimiques, les cotes piézométriques, les volumes annuels pompés, les volumes maximaux autorisés, l'utilisation des eaux pompées, les zones de surveillance des captages, etc.

II.7 CONSULTATION DE L'ATLAS DU KARST

L'*Atlas du Karst Wallon*⁹, réalisé par la Commission Wallonne d'Etude et de Protection des Sites Souterrains (CWEPSS), constitue une base de données de référence qui répertorie, cartographie et décrit de la manière la plus exhaustive possible les sites karstiques et les circulations d'eaux souterraines. En 2011, l'Atlas recensait 6250 phénomènes karstiques (grottes, chantoirs, rivières souterraines, dolines, résurgences, dépressions paléokarstiques) sur l'ensemble du territoire wallon.

La gestion des eaux souterraines des aquifères carbonatés est d'autant plus complexe lorsque ces derniers sont affectés de phénomènes karstiques. En effet, les sites karstiques sont des points d'accès direct vers les eaux souterraines. La vigilance est de rigueur autour de ces points de pertes pour protéger les nappes calcaires. Dès lors, cet atlas apporte une information utile et mérite d'être consulté lors des études délimitant les zones de surveillance autour des captages pour la distribution publique. Ceci est particulièrement vrai pour les synclinaux calcaires condruziens qui renferment les aquifères majeurs exploités pour la production d'eau potable.

II.8 CONSULTATION DES ÉTUDES D'INCIDENCE EXISTANTES

Lorsqu'elles existaient, les études d'incidence des carrières ont été consultées au Service des Archives aux Moulins de Beez ou au Département de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme au SPW. Les informations pertinentes concernant le contexte hydrologique et hydrogéologique, ainsi que les projets d'extensions, ont été intégrées dans les fiches descriptives.

⁸ <http://carto1.wallonie.be/10SousInt/Default.asp>

⁹ http://geologie.wallonie.be/site/geoprod/soussol/phenomenes/ssol_karst

II.9 SYNTHÈSE HYDROGÉOLOGIQUE

Une synthèse hydrogéologique est rédigée à la fin de chaque fiche. Elle ne consiste pas en une étude d'incidences approfondie, mais reprend le contexte géologique et hydrogéologique dans les grandes lignes. Elle constitue une première estimation des conséquences qui découlent de l'approfondissement et de l'extension potentiels de l'exploitation sur l'hydrogéologie et sur les divers ouvrages présents dans la région. Elle suggère ensuite des actions à mettre en place afin de mieux connaître les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques du milieu, et ainsi de minimiser l'interaction entre les carrières et les captages.

II.10 CONFIDENTIALITÉ DES DONNÉES

Ces fiches techniques contiennent donc des informations sur la géologie, sur l'hydrogéologie, sur l'hydrographie, sur la karstologie, des données spécifiques à l'exploitation du site carrier et propres à l'exploitation de l'eau souterraine. Certaines informations ont été considérées comme confidentielles par les carriers. Dès lors, des couleurs ont été attribuées à chacune des rubriques afin d'en limiter l'accès aux consultants des fiches.

Les informations des rubriques reprises en mauve et en bleu sont accessibles à tous publics, ces premières l'étant déjà dans l'étude du Professeur E. Poty (2004). Les informations des rubriques reprises en vert sont restreintes au comité d'accompagnement de l'étude (SPW, Aquawal, Fediex). Les informations des rubriques reprises en rouge ne sont accessibles qu'aux exploitants de la carrière et au SPW.

- code Poty ;
- coordonnées Lambert Belge ;
- actuellement en exploitation ;
- type de roche exploitée ;
- formation géologique ;
- étage stratigraphique ;
- nature des terrains de découverte ;
- géologie structurale ;
- bassin hydrographique ;
- sous-bassin hydrographique ;
- masse d'eau souterraine ;
- code de la RW de la masse d'eau ;
- carte hydrogéologique de la RW ;
- formation hydrogéologique ;
- type de porosité ;
- piézomètres ;
- pertes ;
- résurgences ;

- sources ;
 - eau de surface et cours d'eau ;
 - catégorie des cours d'eau ;
 - type de nappe sollicitée ;
 - pompage d'eau souterraine ;
 - pompage d'eau de ruissellement ;
 - nappe d'eau apparente ;
 - sollicitation d'eau de surface ;
 - zone de prévention arrêtée ou à définir ;
 - station météorologique ;
 - puits pour la distribution publique d'eau potable ;
 - prises d'eau en activité ;
-
- frontières/extension longitudinales de l'aquifère ;
 - frontières/extension transversales de l'aquifère ;
 - frontières/extension longitudinales d'écoulement de la nappe ;
 - frontières/extension transversales d'écoulement de la nappe ;
 - présence d'une limite imperméable ;
 - présence d'un potentiel imposé ;
 - écoulement de la nappe d'eau souterraine ;
 - rivière drainante/infiltrante/en pseudo-équilibre ;
 - cote du niveau de la nappe en équilibre sans exhaure ;
 - synthèse hydrogéologique ;
-
- extension de la carrière ;
 - production moyenne annuelle en roche ;
 - destination de l'eau souterraine ;
 - débit de l'eau souterraine ;
 - destination de l'eau de ruissellement ;
 - débit de l'eau de ruissellement ;
 - niveau du plancher de la carrière ;
 - puits d'exhaure/pompe.

III CONTEXTUALISATION HYDROGÉOLOGIQUE

Afin d'établir un indice permettant de classer les sites carriers selon leur interaction avec les eaux souterraines, nous avons déterminé les paramètres hydrogéologiques pouvant illustrer au mieux par leur combinaison l'interaction entre les carrières et les eaux souterraines. Six paramètres ont ainsi été choisis : trois constituant les paramètres « carrière » et trois autres constituant les paramètres « masse d'eau souterraine ».

III.1 PARAMÈTRES SPÉCIFIQUES À LA CARRIÈRE

Les trois paramètres qui ont été choisis pour représenter le site carrier sont le contexte hydrogéologique, le contexte géologique et le contexte piézométrique.

III.1.1 Contexte hydrogéologique

Le contexte hydrogéologique (**paramètre H**) est défini par la formation hydrogéologique au niveau de laquelle la carrière est ouverte.

Il existe 71 formations hydrogéologiques en Wallonie dont 31 sont directement concernées par l'activité extractive (*Annexe 3*). Dès lors, les quatre catégories suivantes ont été définies :

- **H₁** : L'exploitation est ouverte dans une formation aquiclude, y compris aquiclude à niveaux aquitards. On appellera cette catégorie « **contexte aquiclude** » ;
- **H₂** : L'exploitation est ouverte dans une formation aquitard, y compris aquitard à niveaux aquifères et aquiclude à niveaux aquifères. On appellera cette catégorie « **contexte aquitard** » ;
- **H₃** : L'exploitation est ouverte dans une formation aquifère. On appellera cette catégorie « **contexte aquifère** » ;
- **H₄** : L'exploitation est ouverte dans une formation « aquifère carbonaté ». On appellera cette catégorie « **contexte aquifère carbonaté** ».

Les appellations aquiclude, aquitard et aquifère font référence aux regroupements des formations géologiques d'après leurs caractéristiques hydrodynamiques en unités hydrogéologiques (*Fetter 2001*). Les regroupements choisis et leurs appellations sont ceux utilisés par les cartes hydrogéologiques de Wallonie (*Figure III.1*)¹⁰.

Une distinction est faite entre les aquifères et les aquifères carbonatés. En effet, la conductivité hydraulique des roches calcaires, dolomitiques et crayeuses est augmentée par la dissolution de la roche, ce qui entraîne la formation d'environnements karstiques complexes (*Ronayne 2013*). Il est difficile de localiser les zones d'écoulement souterrain préférentiel et de dimensionner les réseaux karstiques, malgré les phénomènes présents en surface (pertes, résurgences, sources). Ceci peut conduire à des soucis de discrétisation lors de la réalisation de modèles mathématiques.

¹⁰ <http://environnement.wallonie.be/cartosig/cartehydrogeo/>

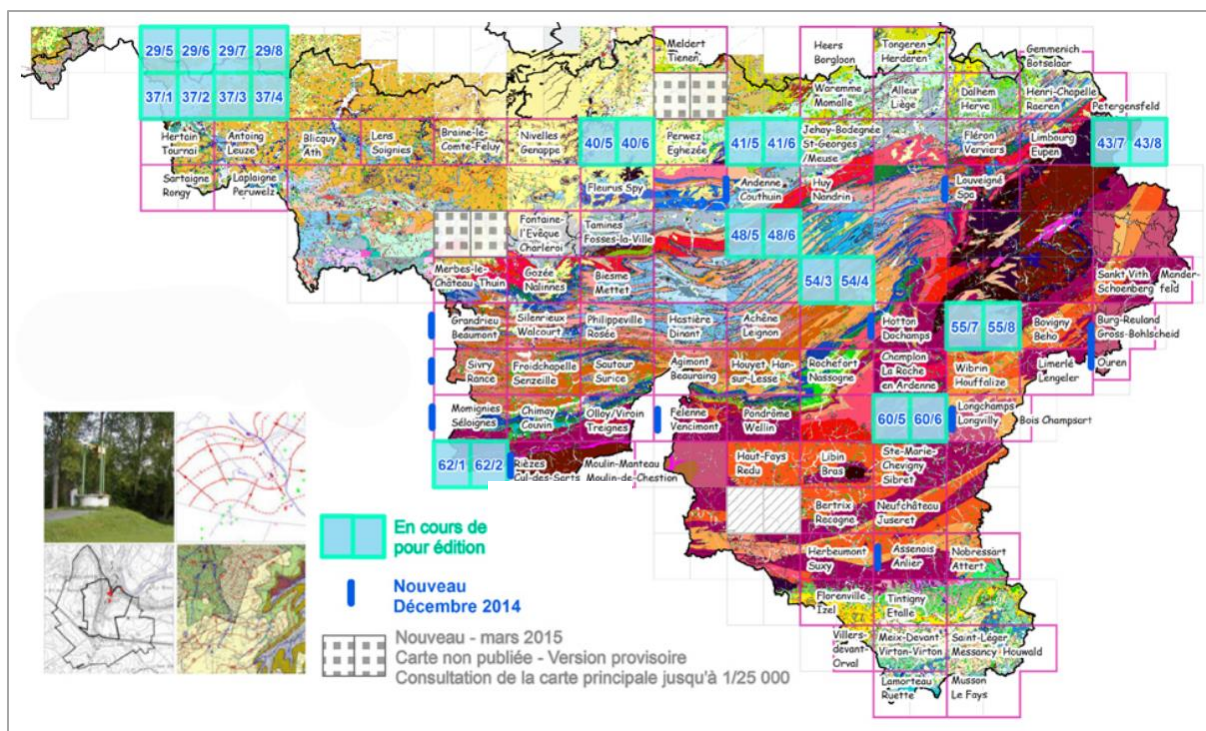


Figure III.1 : Ensemble des cartes hydrogéologiques déjà réalisées en Wallonie (légende : Annexe 3).

De manière détaillée, les unités hydrogéologiques sont les suivantes (Chapuis 1999 ; Freeze et Cherry 1979) :

H₁ : Aquiclude : unité hydrogéologique saturée incapable de fournir ou de transmettre des quantités significatives d'eau sous des gradients hydrauliques ordinaires.

Les aquicludes correspondent à des roches terrigènes détritiques imperméables telles que les schistes et leurs produits d'altération, les argiles. Ils comprennent également des roches composites telles que les marnes qui sont des roches détritiques-biochimiques.

Dans le cadre de cette étude, sont reprises dans cette catégorie les formations hydrogéologiques suivantes :

- Aquiclude de remplissage du Hainaut ;
- Aquiclude-aquitard des argiles de l'Eocène ;
- Aquiclude d'argiles de remplissage ;
- Aquiclude du Famennien ;
- Aquiclude du Dévonien inférieur ;
- Aquiclude du socle cambro-silurien ;
- Aquitard à niveaux aquicludes du socle cambro-silurien.

H₂ : Aquitard : unité hydrogéologique peu perméable du point de vue de l'utilisation économique de l'eau, mais suffisamment perméables pour qu'on les considère dans les études hydrogéologiques.

Les aquitards consistent en des formations géologiques sédimentaires telles que les limons ou les siltites, dont la granulométrie est intermédiaire entre celle du grès, plus grossière, et

celle du schiste, plus fine, ou encore les roches dans lesquelles alternent des sédiments de natures différentes.

Dans le cadre de cette étude, sont reprises dans cette catégorie les formations hydrogéologiques suivantes :

- Aquitard limoneux ;
- Aquiclude à niveaux aquifères du Houiller ;
- Aquifère, aquitard, aquiclude de l'assise d'Hastière ;
- Aquitard du Famennien ;
- Aquiclude à niveaux aquifères du Dévonien inférieur ;
- Aquifère à niveaux aquicludes du Dévonien inférieur ;
- Aquitard à niveaux aquifères du socle cambro-silurien ;
- Aquiclude à niveaux aquifères du socle cambro-silurien.

H₃ : Aquifère : *unité hydrogéologique saturée pouvant transmettre des quantités significatives d'eau sous des gradients hydrauliques ordinaires (ou faibles) ou capables de fournir des quantités d'eau économiquement exploitables.*

Les aquifères peuvent être de deux types : les roches meubles, telles que les sables et les roches cohérentes, telles que les grès et les quartzites, imperméables à l'échelle microscopique, mais dont les fissures permettent à des flux d'eau plus ou moins importants de circuler localement.

Dans le cadre de cette étude, sont reprises dans cette catégorie les formations hydrogéologiques suivantes :

- Aquifère des sables de remplissage ;
- Aquifère des sables de l'Eocène ;
- Aquifère des sables du Paléocène ;
- Aquifère de Virton ;
- Aquifère des grès sableux d'Orval ;
- Aquifère des grès du Famennien ;
- Aquifère des sables de l'Entre-Sambre-et-Meuse ;
- Aquifère du Famennien supérieur ;
- Aquitard à niveaux aquifères des massifs intrusifs du socle du Brabant.

H₄ : Aquifère carbonaté : *unité hydrogéologique constituée de roches cohérentes qui, du fait de leur texture (par exemple les craies) ou d'altérations particulières (par exemple la karstification des calcaires), présentent plusieurs types de porosités superposées. De ce fait, cette unité hydrogéologique est devenue encore plus perméable et est dès lors capable de fournir de grandes quantités d'eau.*

Les aquifères carbonatés correspondent à des roches sédimentaires biogènes telles que les craies et les calcaires. Ces roches présentent une haute perméabilité et donc une importante capacité d'emménagement et de production d'eau. L'atlas du karst (CWEPPS) a été consulté afin d'aider à répertorier les formations hydrogéologiques à reprendre dans cette catégorie.

- Aquifère des calcaires du Carbonifère ;
- Aquifère des grès calcaires de Florenville ;
- Aquifère des calcaires du Frasnien ;
- Aquifère des calcaires du Givetien ;
- Aquifère des calcaires de l'Eifelien ;
- Aquifère des calcaires dévono-carbonifères ;
- Aquifère des craies du Crétacé.

Si l'on classe l'ensemble des sites carriers wallons selon ce paramètre, on obtient la répartition suivante (*Figure III.2*). On constate que plus des trois quarts des sites carriers sont ouverts au niveau de formations hydrogéologiques au caractère aquifère.

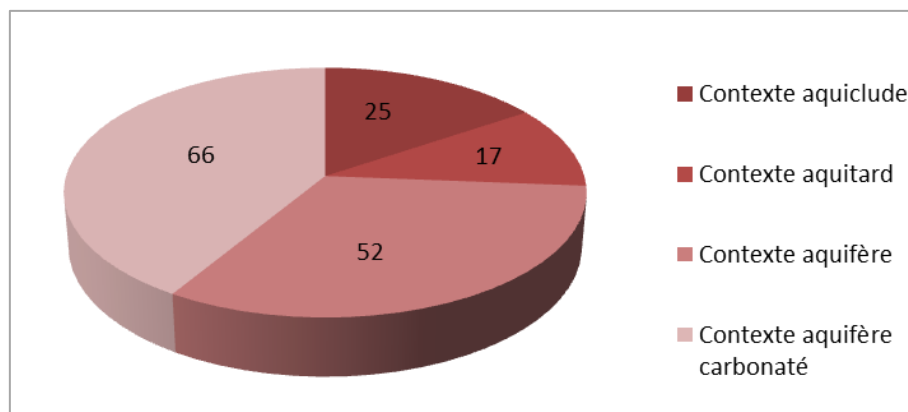


Figure III.2 : Répartition des 160 carrières wallonnes dans les quatre catégories du paramètre « contexte hydrogéologique ».

III.1.2 Contexte géologique

Le contexte géologique (**paramètre G**) est défini par les caractéristiques lithologiques et structurales, l'extension de la formation géologique exploitée dans la carrière et celles des formations géologiques limitrophes qui vont régir les directions d'écoulement de la nappe souterraine tout comme la présence d'un réseau hydrographique.

Quatre catégories ont ainsi été définies (*Figure III.3*). Il a été nécessaire de délimiter en termes de superficie l'étendue de la formation géologique pour chacune de celles-ci afin de restreindre l'échelle d'investigation autour du site carrier étudié et de bien distinguer les différentes catégories.

- **G₁** : L'exploitation est ouverte dans une formation complètement isolée par d'autres formations géologiques de faible conductivité hydraulique, dû soit à une variation latérale de faciès soit à cause de la structure géologique régionale (formation d'une cuvette ou d'un dôme par ennoyage de la formation par exemple). L'étendue de l'unité hydrogéologique n'excède pas 5 km². On appellera cette catégorie « **contexte totalement isolé** ».

Il s'agit par exemple de la carrière de Tapoumont, où est exploité un bioherme calcaire (un monticule micritique) isolé dans une masse de roche argileuse (des shales) (*Figure III.4*).

- **G₂** : L'exploitation est ouverte dans une formation dont l'extension est limitée latéralement par des formations géologiques de faible conductivité hydraulique et/ou par un cours d'eau

important imposant le niveau d'eau à l'échelle régionale (potentiel imposé). L'extension de l'unité hydrogéologique est ainsi limitée ; elle n'excède pas 10 km². On appellera cette catégorie « **contexte partiellement isolé** ».

Il s'agit par exemple des carrières de Triffoy et Royseux, où sont exploités des grès. Elle se situe sur le flanc sud de l'extrémité d'un synclinal ennoyé vers l'est et limité par une formation de type aquiclude. Les écoulements souterrains sont limités à l'est par un important cours d'eau (l'Ourthe) (*Figure III.5*).

- **G₃** : L'exploitation est ouverte dans une formation d'extension locale, c'est-à-dire dont l'extension est importante mais toutefois limitée latéralement par des formations de faible conductivité hydraulique. L'étendue de la formation hydrogéologique n'excède pas 40 km². On appellera cette catégorie « **contexte extension locale** ».

Il s'agit par exemple de la carrière d'Herbeton-Berthe, où est exploité du calcaire (*Figure III.6*). Les écoulements souterrains sont limités au nord et au sud par une formation de type aquitard.

- **G₄** : L'exploitation est ouverte dans une formation aquifère dont l'extension est importante, dite régionale. L'étendue de la formation hydrogéologique excède les 40 km². On appellera cette catégorie « **contexte extension régionale** ».

Il s'agit par exemple de la carrière Emond en Gaume où est exploité un grès calcaire (*Figure III.7*) ou encore de nombreuses carrières du Tournaisis.

Précisons que lorsque la roche exploitée correspond à une formation à lithologie imperméable (argiles et marnes), la lithologie des formations limitrophes n'est pas considérée pour établir le contexte géologique, mais uniquement l'extension de la formation concernée par l'exploitation (argillère).

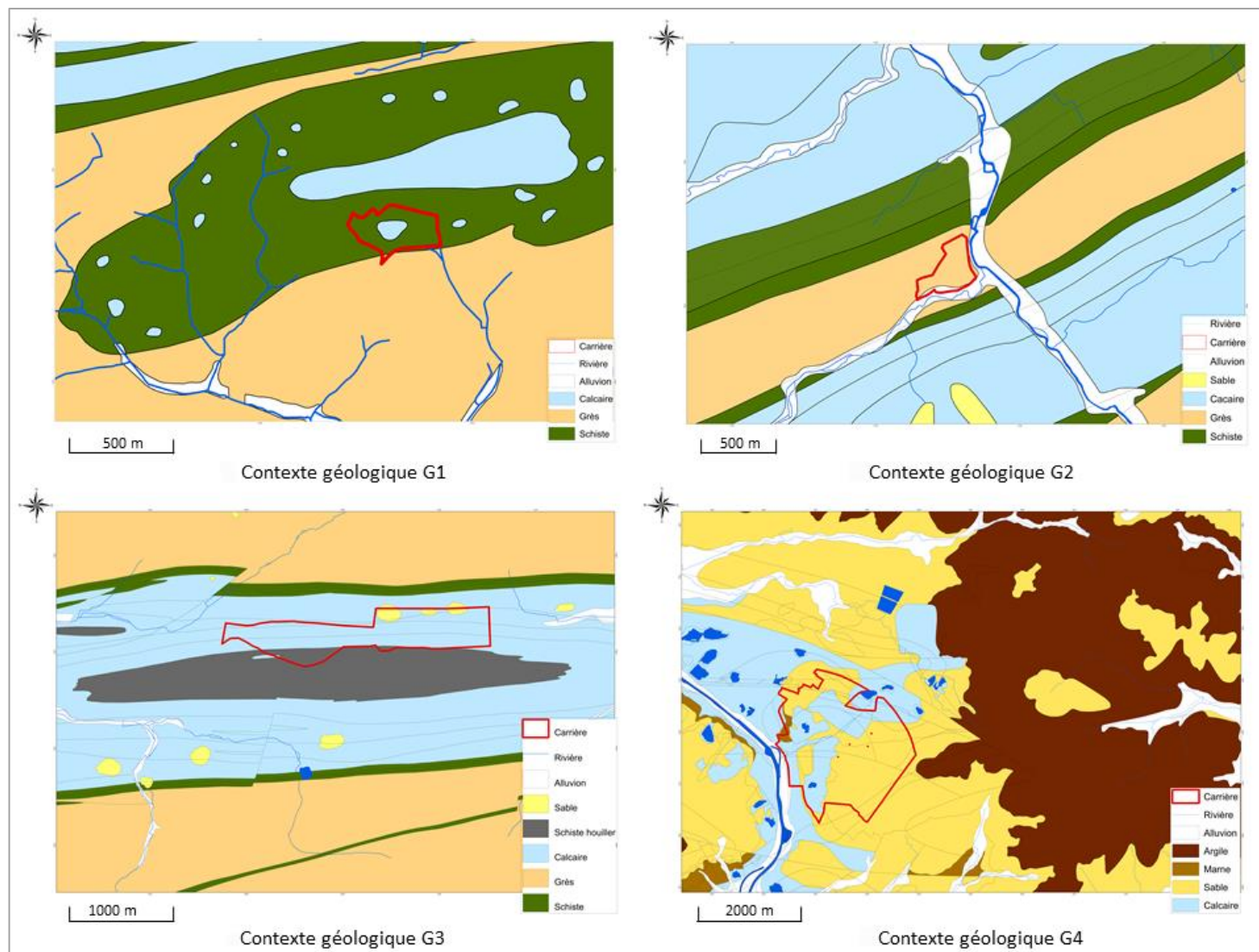


Figure III.3 : Les quatre contextes géologiques définis.

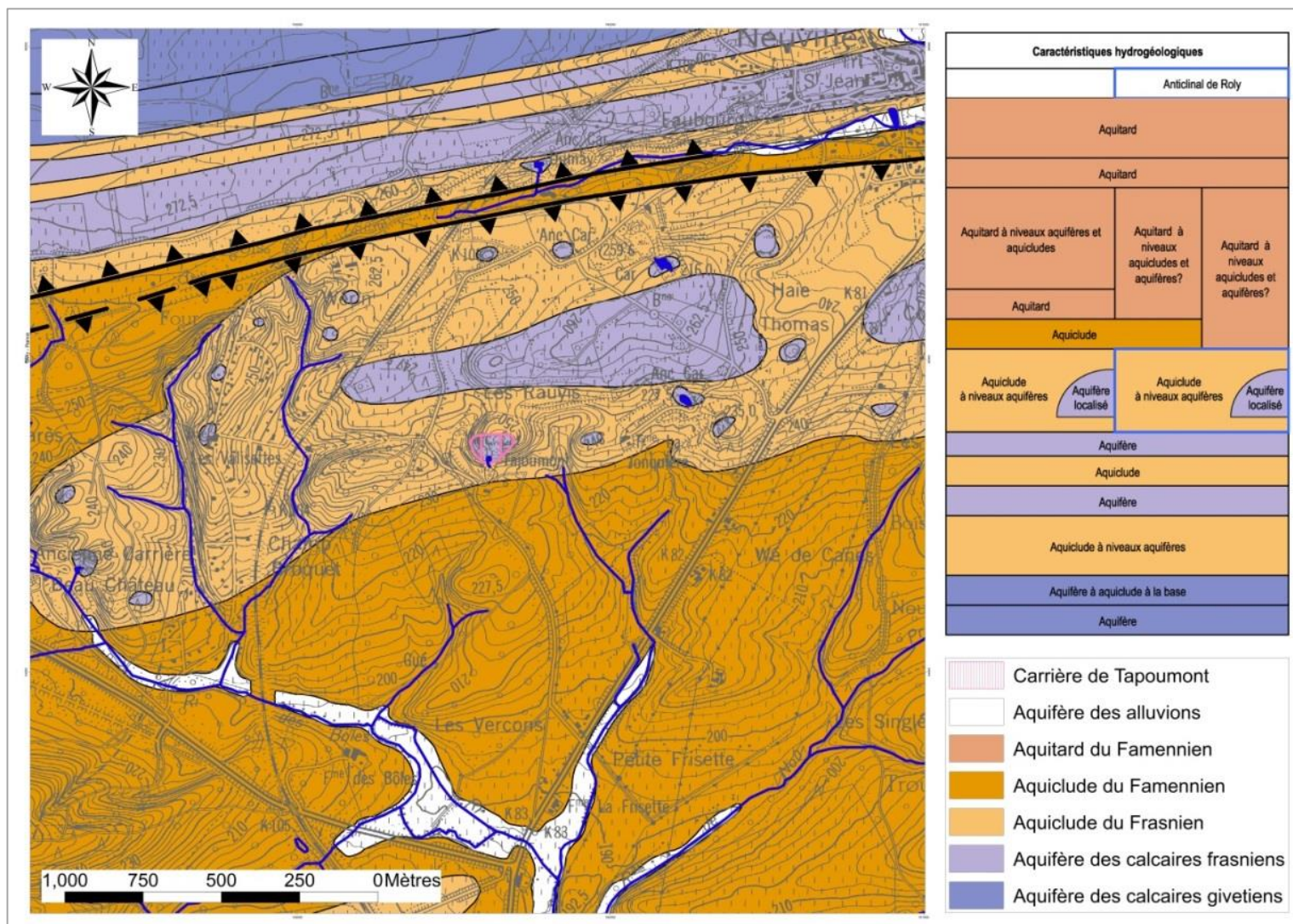


Figure III.4 : Exemple de la carrière de Tapoumont (carte hydrogéologique 57/3-4 de Froidchapelle – Senzeille).

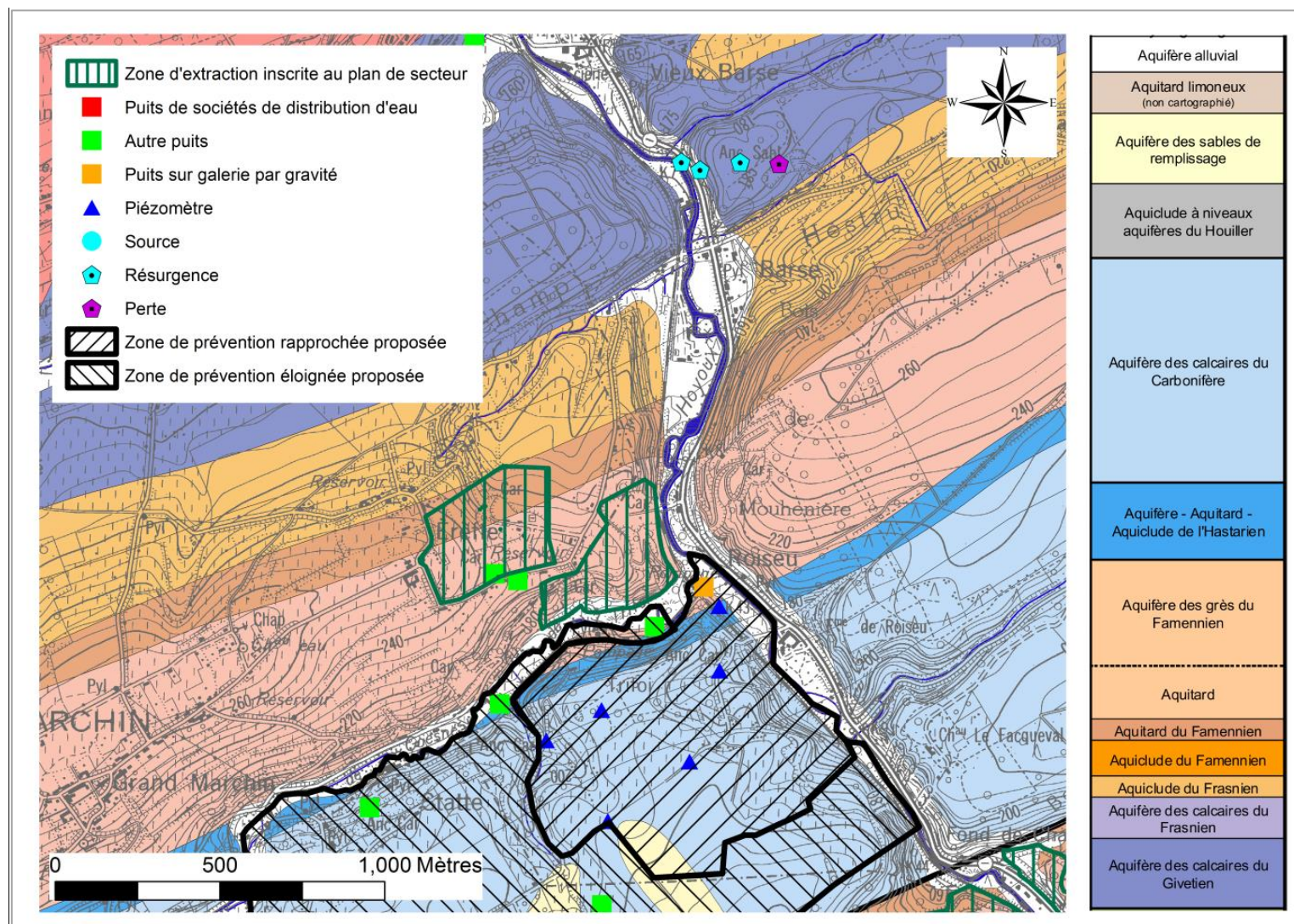


Figure III.5 : Exemple des carrières de Triffoy et Royseux (carte hydrogéologique 48/3-4 de Huy - Nandrin).

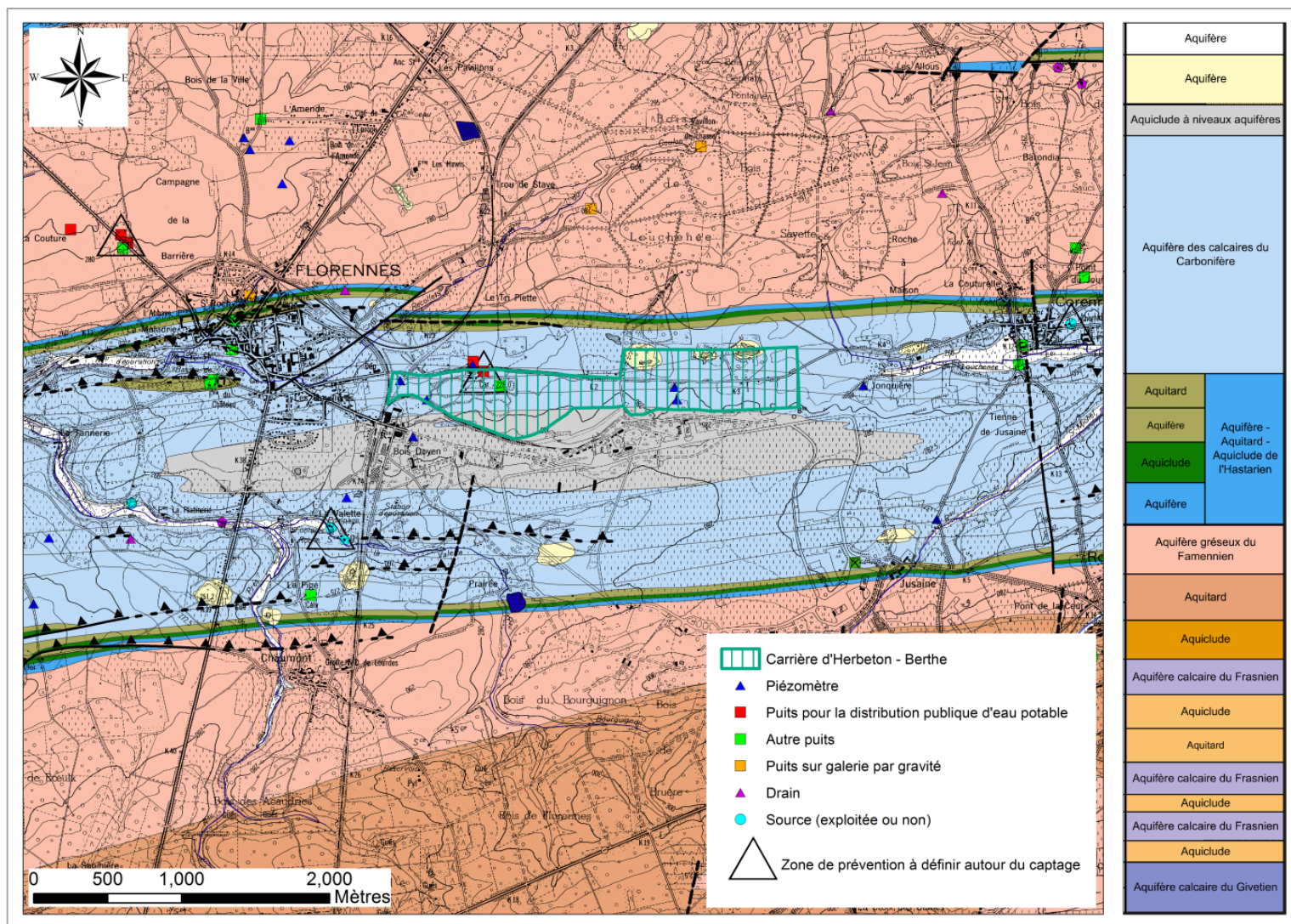


Figure III.6 : Exemple de la carrière d'Herbeton - Berthe (carte hydrogéologique 53/5-6 de Philippeville - Rosée).

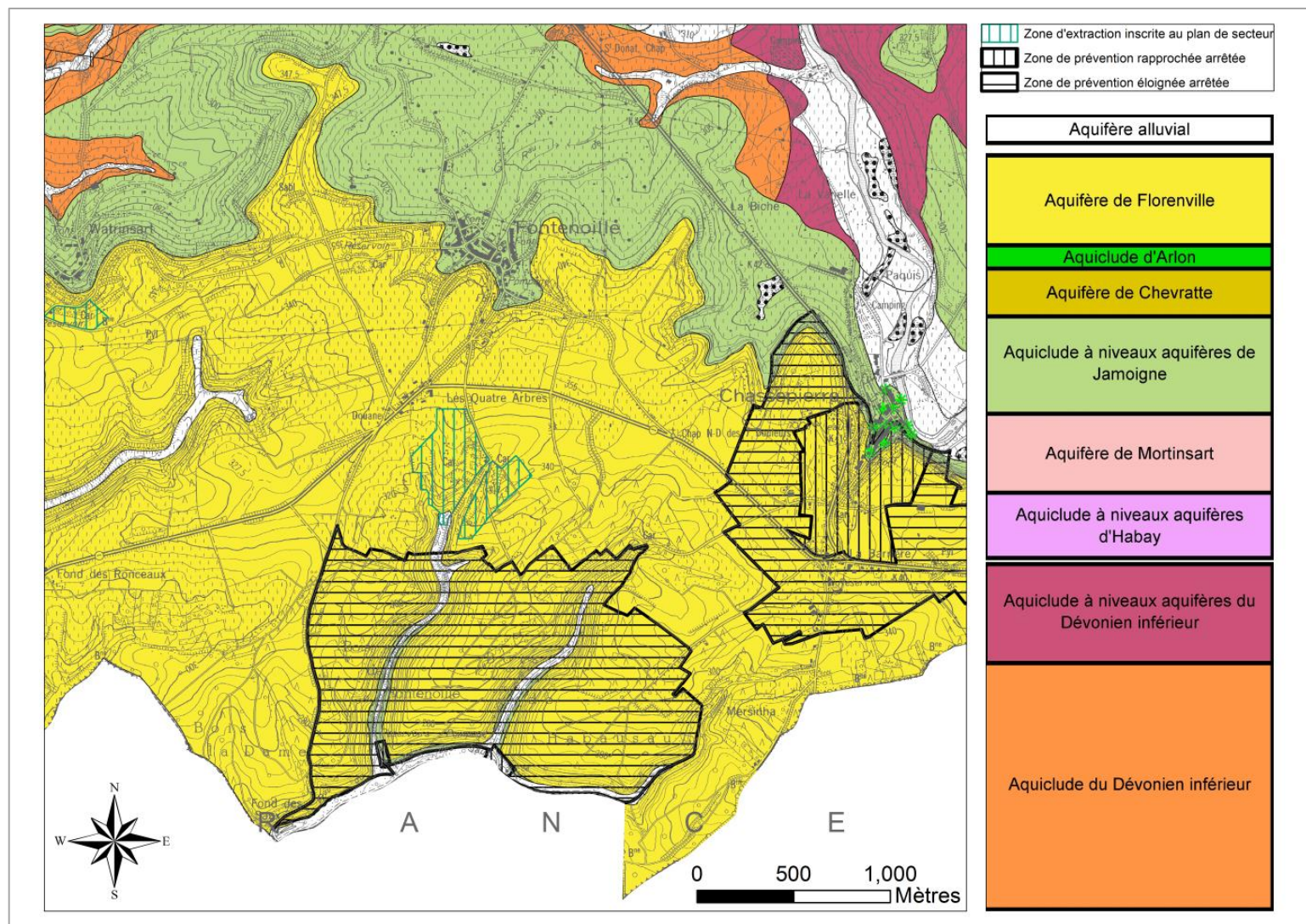


Figure III.7 : Exemple de la carrière Emond (carte hydrogéologique 67/7-8 de Florenville - Izel).

Si l'on classe l'ensemble des sites carriers wallons selon ce paramètre, on obtient la répartition suivante (*Figure III.8*). On constate que plus de la moitié des sites carriers sont ouverts dans des formations hydrogéologiques d'extension régionale alors que moins d'un dixième sont ouverts dans une formation hydrogéologique dont l'extension est limitée de toutes parts par des formations imperméables.

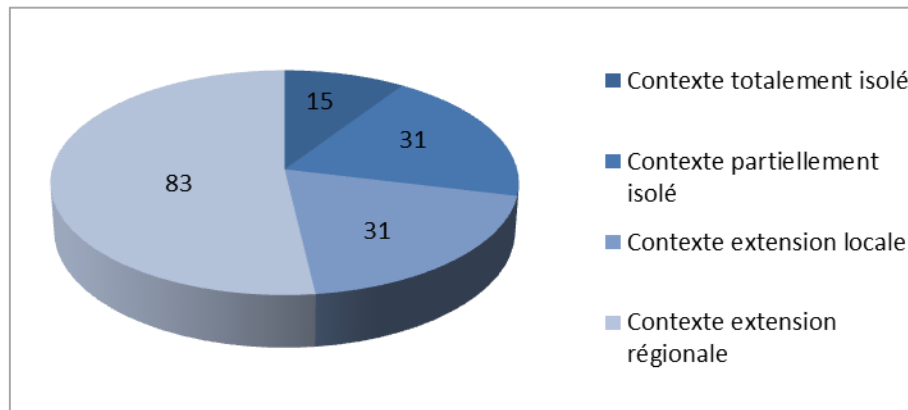


Figure III.8 : Répartition des 160 carrières wallonnes dans les quatre catégories du paramètre « contexte géologique ».

III.1.3 Contexte piézométrique

Le contexte piézométrique (**paramètre P**) est défini par le niveau (et donc également par l'amplitude des fluctuations saisonnières maximales) de la nappe en équilibre dans la formation hydrogéologique dans laquelle se situe le site carrier. Le niveau piézométrique de la nappe à son plus haut niveau doit être évalué par rapport au plancher de la carrière.

La cote altimétrique de la nappe fluctue suivant les variations saisonnières des précipitations, de l'évapotranspiration et de l'infiltration. Cette dernière, selon la nature des terrains de couverture peut être retardée par rapport à la période de pluies efficaces. En conditions normales et sur un cycle annuel, le volume d'eau qui s'infiltré dans la roche étant égal à celui qui en sort, la réserve en place demeure constante.

Il existe une sorte d'état d'équilibre au sein de la formation hydrogéologique, tel que la hauteur de fluctuation saisonnière des niveaux d'eau demeure relativement constante d'une année à l'autre. De manière générale, les fluctuations moyennes annuelles sont plus prononcées dans les unités hydrogéologiques à nappe libre que dans les unités hydrogéologiques à nappe semi-confinée et confinée (*Environment Agency 2007*).

Un autre facteur, anthropique, qui influence le niveau piézométrique de la nappe d'eau en entraînant son rabattement, est l'exhaure mise en place dans le cadre de l'exploitation d'un site carrier. Suivant l'approfondissement de ce dernier, il existe quatre cas de figure :

- **P₁** : La cote altimétrique du plancher (P) de la carrière est supérieure à la cote piézométrique de la nappe souterraine concernée (N). Il n'y a donc aucune exhaure. On appellera cette catégorie « **contexte P > N** » (*Figure III.9*) ;

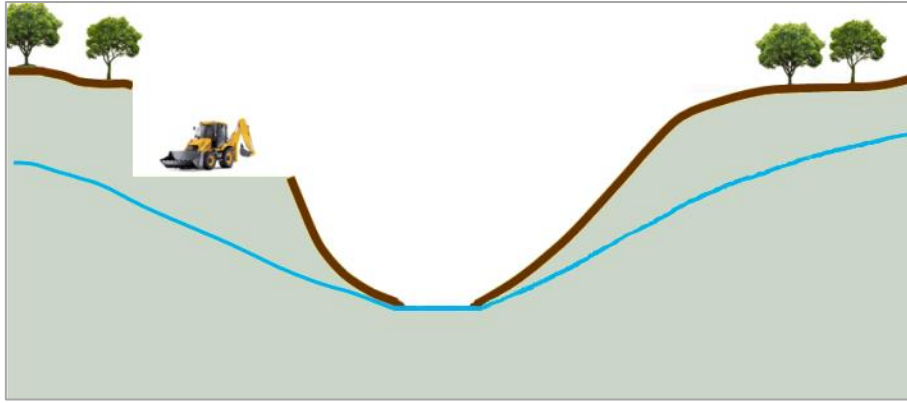


Figure III.9 : Cote altimétrique du plancher supérieure à la cote piézométrique de la nappe souterraine.

- **P₂** : La cote altimétrique de la carrière est inférieure à la cote piézométrique naturelle de la nappe mais supérieure à celle du thalweg d'une rivière (T) imposant le niveau de base régional. L'exhaure exercée dans la carrière rabat la nappe au niveau du plancher inférieur de la carrière. On appellera cette catégorie « **contexte P = N > T** » (Figure III.10) ;



Figure III.10 : Cote altimétrique du plancher inférieure à la cote piézométrique de la nappe souterraine mais supérieure à celle du niveau de base régional.

- **P₃** : La cote altimétrique du plancher de la carrière est inférieure à la cote piézométrique naturelle de la nappe et à la cote altimétrique du thalweg d'une rivière qui constitue le niveau de base régional (NB). L'exhaure exercée dans la carrière rabat la nappe au niveau du plancher inférieur de la carrière. La rivière impose la cote piézométrique de la nappe au niveau de son thalweg (condition frontière : potentiel imposé). On appellera cette catégorie « **contexte P = N < T (=NB)** » (Figure III.11) ;

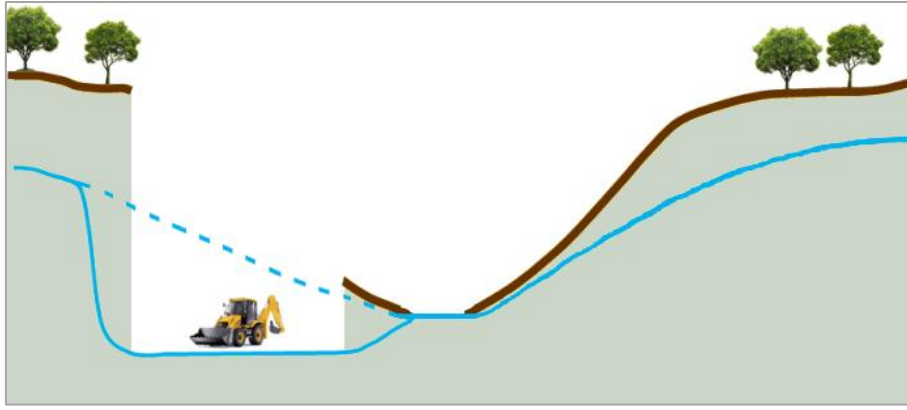


Figure III.11 : Cote altimétrique inférieure à la cote piézométrique de la nappe et à la cote altimétrique du thalweg constituant le niveau de base régional.

- **P₄** : La cote altimétrique de la carrière est inférieure à la cote piézométrique de la nappe et à la cote altimétrique du thalweg d'une rivière. L'exhaure exercée dans la carrière rabat la nappe au niveau du plancher inférieur de la carrière. La rivière n'impose plus le niveau piézométrique de la nappe et le cône de dépression se propage au-delà de la rivière. La rivière devient alors perchée. On appellera cette catégorie « **P = N < T (≠NB)** » (Figure III.12).

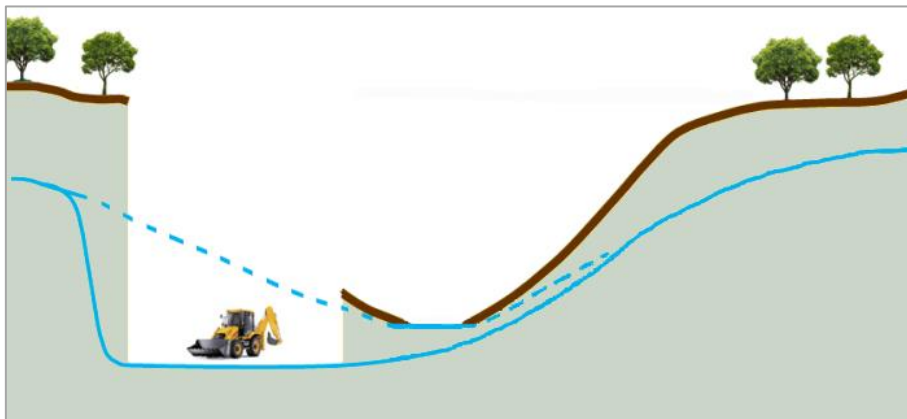


Figure III.12 : Cote altimétrique inférieure à la cote piézométrique de la nappe et à la cote altimétrique du niveau de base régional dont le potentiel n'est plus imposé.

Remarquons que dans le contexte piézométrique **P₃**, seule la rive côté carrière est affectée et le cours d'eau demeure drainant sur la rive opposée à l'exploitation. Dans ce contexte, les volumes pompés dans la carrière pourraient être très élevés. Tandis que dans le contexte piézométrique **P₄**, le cours d'eau devient également infiltrant sur sa rive opposée au site carrier et le cône de rabattement de la nappe s'étend au-delà, impactant ainsi le rendement des captages situés sur la rive opposée à l'exploitation. Afin de différencier des deux contextes piézométriques, la présence de piézomètres est nécessaire pour pouvoir déterminer où se trouve le niveau de la nappe souterraine par rapport à celui de la rivière. Malheureusement, il n'y en a pas systématiquement et le doute plane quant au décrochement de la nappe suite à l'exhaure réalisée dans la carrière.

Si l'on classe l'ensemble des sites carriers wallons selon ce paramètre, on obtient la répartition suivante (*Figure III.13*). On constate que plus de la moitié des sites carriers présentent un plancher à une cote altimétrique inférieure à celle de la nappe souterraine.

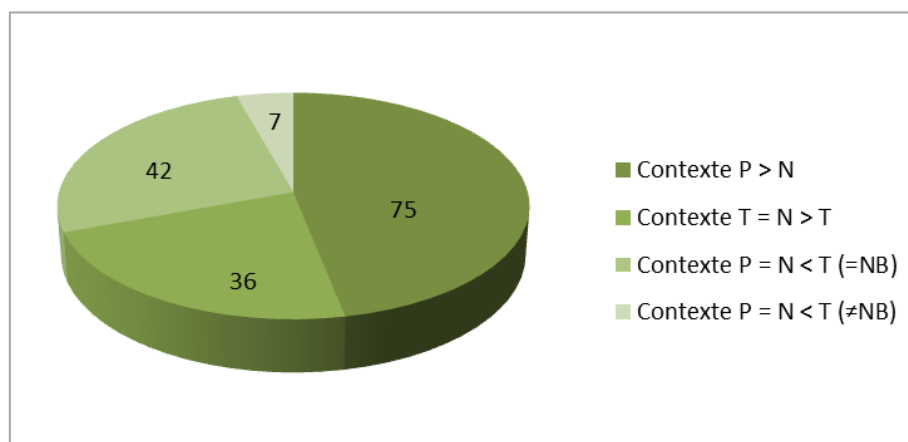


Figure III.13 : Répartition des 160 carrières wallonnes dans les quatre catégories du paramètre « contexte piézométrique ».

Précisons que dans le cas où la nappe souterraine a été atteinte lors de l'approfondissement du site carrier mais n'est pas pompée, la roche est exploitée sous eau au moyen de draglines et le niveau piézométrique à prendre en compte est celui de la nappe en équilibre. Le contexte piézométrique est alors le P₂, la modification de la piézométrie régionale étant très limitée.

III.1.4 Synthèse de la situation en Région wallonne

Les trois paramètres relatifs aux sites carriers ainsi définis, une classification synthétique des 160 sites carriers en activité en Wallonie peut être représentée comme suit (*Tableau III.1*).

		Contexte géologique					
		Totalement isolé	Partiellement isolé	Extension locale	Extension régionale		
Contexte hydrogéologique	Aquifère carbonaté				7	P = N < T (≠NB)	Contexte piézométrique
			6	5	14	P = N < T (=NB)	
		1	3		7	P = N > T	
		2	4	5	12	P > N	
	Aquifère					P = N < T (≠NB)	
					4	P = N < T (=NB)	
			1	4	8	P = N > T	
			10	3	22	P > N	
	Aquitard					P = N < T (≠NB)	
		4				P = N < T (=NB)	
				1	1	P = N > T	
		1	5	4	1	P > N	
	Aquiclude					P = N < T (≠NB)	
				2		P = N < T (=NB)	
		6	2	3	6	P = N > T	
		1		4	1	P > N	

Tableau III.1 : Classification des 160 sites carriers en activité en Wallonie selon les paramètres spécifiques aux carrières.

On constate que la majorité des sites carriers wallons (116 des 160, soit 72,5%) est ouverte dans des formations aquifères et aquifères carbonatées et que plus de la moitié des sites

carriers (85 des 160, soit 53%) ont leur fond de fosse sous eau, même si seulement une soixantaine réalisent de l'exhaure.

Il est clair qu'en fonction de l'évolution de l'exploitation de la carrière (extension, approfondissement) et donc de la modification du niveau altimétrique du fond de fosse par rapport au niveau piézométrique de la nappe souterraine (paramètre P), la classification des sites carriers peut évoluer dans le temps.

III.2 PARAMÈTRES SPÉCIFIQUES À LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE

Les trois paramètres qui ont été choisis pour représenter la masse d'eau souterraine dans laquelle pompent les captages pour la distribution publique d'eau potable sont la position relative du site carrier et des captages, la production des captages et le potentiel qualitatif de l'eau souterraine.

III.2.1 Position relative du site carrier et des captages pour la distribution publique

Les captages pour la distribution publique d'eau potable sont menacés par diverses sources de pollution. Plus on se rapproche du captage, plus l'impact d'une pollution risque d'être importante. Dans ce cadre, un système de protection des prises d'eau, basé sur la vitesse de circulation de l'eau souterraine (temps de transfert), a été mis en place. Autour d'un captage, quatre zones successives (*Figure III.14*), à l'intérieur desquelles les activités et les installations sont réglementées, sont déterminées conformément aux directives européennes. L'aire géographique de chacune diffère en fonction de l'hydrogéologie locale de la nappe exploitée et de la nature des sols (*Vernoux et al. 2007*).

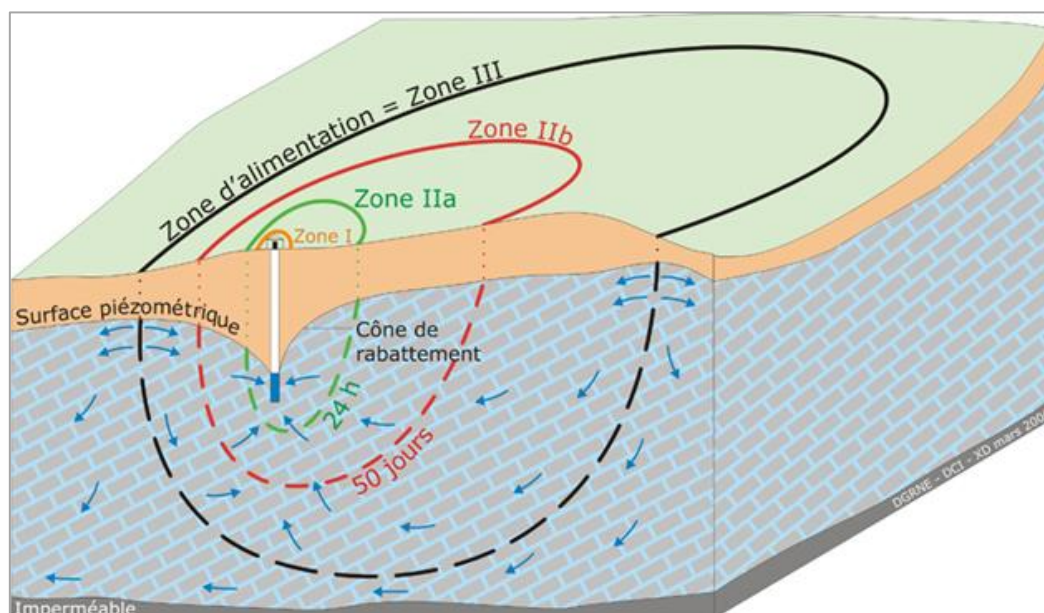


Figure III.14 : Zones de surveillance et zones de protection d'un captage¹¹.

¹¹ <http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas/>

- **Zone I** : la zone de prise d'eau est délimitée par la ligne située à une distance de 10 mètres des limites extérieures des installations de surface nécessaires à la prise d'eau. Elle est la propriété du producteur d'eau, et seules les activités en rapport avec la production d'eau y sont autorisées ;
- **Zone IIa** : la zone de prévention rapprochée est la zone à l'intérieur de laquelle une pollution transportée par l'eau souterraine mettrait au plus 24 heures pour atteindre le captage (ou une zone d'un rayon de 35 mètres pour les aquifères sableux) ;
- **Zone IIb** : la zone de prévention éloignée est la zone à l'intérieur de laquelle une pollution mettrait entre 1 et 50 jours pour atteindre le captage (ou une zone d'un rayon de 135 mètres pour les aquifères sableux) ;
- **Zone III** : la zone de surveillance correspond à l'entière du bassin d'alimentation du captage et le bassin hydrogéologique susceptibles d'alimenter le captage. Elle ne fait généralement pas l'objet d'impositions particulières.

La Région wallonne a chargé la SPGE, en collaboration avec les différents producteurs d'eau potable, de déterminer les périmètres de protection des zones de captage (*Figure III.15*)¹².

Les zones de prévention des captages actifs approuvées par arrêté ministériel et celles dont l'enquête publique est en cours ou est terminée peuvent être consultées sur le portail « environnement » de la Région wallonne. La recherche se fait par arrondissement.

Suivant la position des sites carriers par rapport aux captages situés dans la région, ils seront repris dans une des quatre zones suivantes. Ces zones définiront les catégories du **paramètre C**.

- **C₁** : Carrière ouverte hors de la zone d'alimentation des captages mais en continuité hydrogéologique ou à risque d'interaction. On appellera cette catégorie « **contexte hors zone d'alimentation** ». Il s'agit par exemple des carrières de Loën et d'Hallembaye (*Figure III.16*) ;
- **C₂** : Carrière ouverte dans la zone d'alimentation des captages (zone III). On appellera cette catégorie « **contexte dans zone d'alimentation** » ;
- **C₃** : Carrière ouverte dans la zone de prévention éloignée des captages pour la distribution publique (zone IIb). On appellera cette catégorie « **contexte zone IIb** » ;
- **C₄** : Carrière ouverte dans la zone de prévention rapprochée des captages pour la distribution publique (zone IIa). On appellera cette catégorie « **contexte zone IIa** ». Il s'agit par exemple de la carrière Les Petons (*Figure III.17*).

¹² <http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas/>

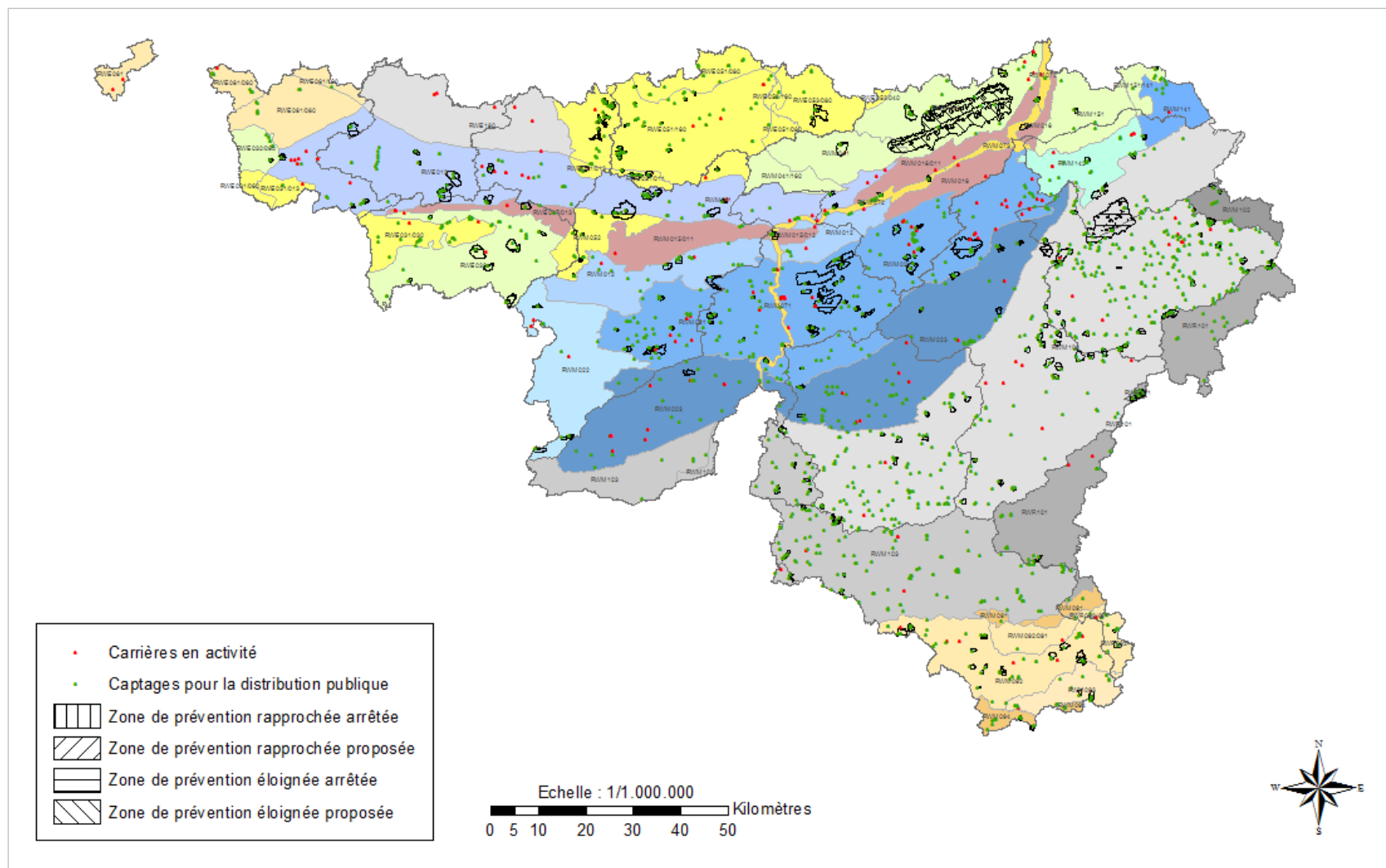


Figure III.15 : Localisation des sites carriers et des captages pour la distribution publique et de leurs zones de prévention.

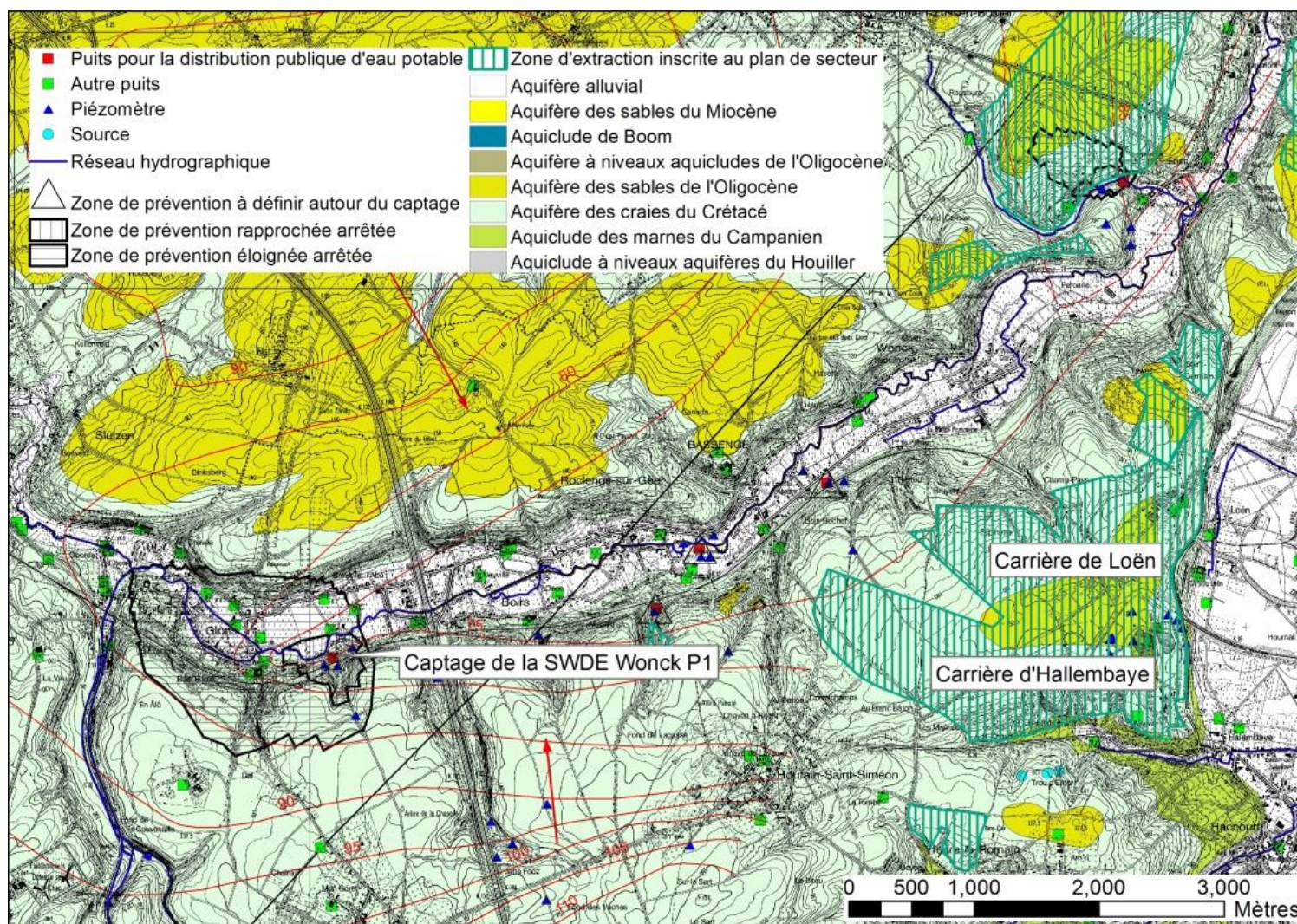


Figure III.16 : Exemple des carrières de Loën et d'Hallembaye qui se situent dans les craies crétacées, hors de la zone d'alimentation du captage de la SWDE Wonck P1 (carte hydrogéologique 34-5/6 Tongeren - Herderen).

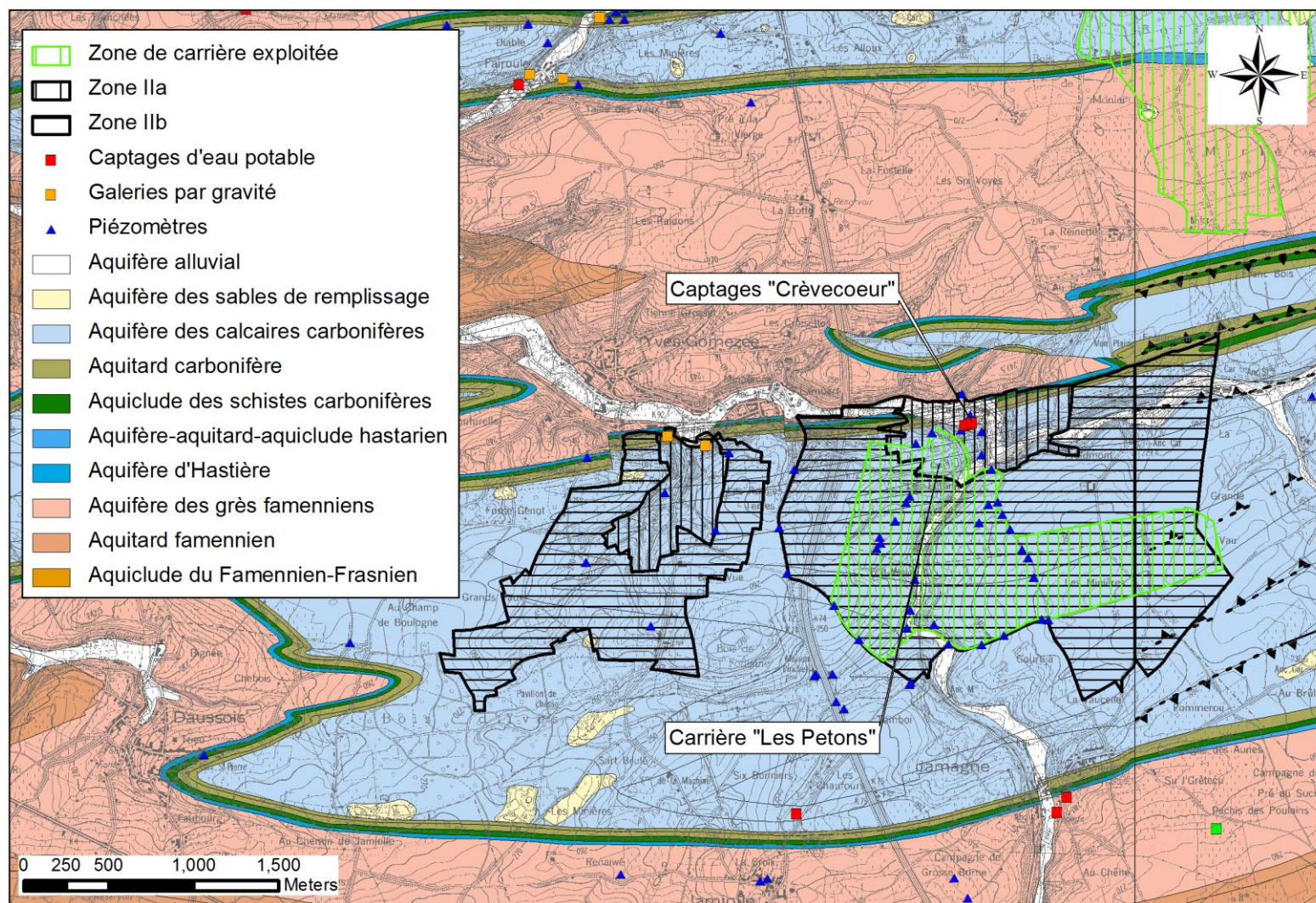


Figure III.17 : Exemple des captages pour la distribution publique Crèvecœur dont les zones de prévention éloignée et rapprochée s'étendent sur la zone de la carrière Les Petons (carte hydrogéologique de Silenrieux-Walcourt).

Si l'on classe l'ensemble des sites carriers wallons selon ce paramètre, on obtient la répartition suivante (*Figure III.18*). On constate que presque les trois quarts des sites carriers se situent en dehors de la zone d'alimentation des captages pour la distribution publique d'eau potable.

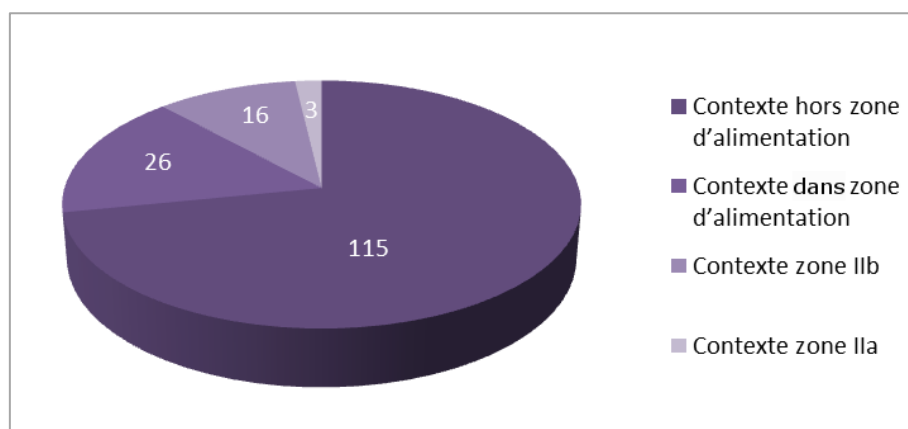


Figure III.18 : Répartition des carrières wallonnes dans les quatre catégories du paramètre « position relative de la carrière et les captages pour la distribution publique ».

III.2.2 Production des captages

La banque de données « Dix-Sous » fournit les historiques des volumes annuels prélevés dans les puits et les captages d'eau souterraine potabilisable, publics et privés. Le site web de la Région wallonne permet de rechercher la position des prises d'eau autour d'un point de coordonnées Lambert connues et dans un rayon déterminé¹³. La taille du rayon est choisie en fonction de l'étendue du bassin versant, déterminée à l'aide du contexte géologique (paramètre G) et du contexte hydrogéologique (paramètre H). En Wallonie, le rayon de recherche est compris entre 500 mètres et maximum 5 kilomètres.

Il est donc aisé, à l'aide de cette approche géocentrique, de déterminer le volume (annuel maximale autorisé) exploité dans les captages pour la distribution publique implantés dans la formation hydrogéologique dans laquelle une carrière est ouverte (**paramètre T**).

Remarquons que le périmètre de recherche correspond à l'étendue d'un cercle, il s'étend donc souvent dans des directions où les captages ne doivent pas être pris en compte, telles qu'au-delà des formations imperméables ou au-delà du réseau hydrographique (si celui-ci constitue un potentiel imposé).

Les volumes d'eau souterraine pompés dépendent en particulier de la nature du terrain. Toutes les nappes d'eau souterraine sont mises à contribution par des captages même si certaines sont plus sollicitées que d'autres en raison de leur potentialité (et des besoins en eau locaux, ou régionaux, du moment).

¹³ <http://carto1.wallonie.be/10SousInt/Default.asp>

La nature des terrains va également influencer le mode de captage (galeries gravitaires dans les calcaires, puits forés dans les formations gréseuses, etc.). Les principaux modes utilisés en Belgique sont les suivants (*Gulinck 1966*) :

- les drains superficiels, procédé souvent utilisé lorsque l'on veut capter de petites sources superficielles formant une tête de vallon, notamment en Ardenne. Exemple : les captages Weywertz (de 2,4 à 5 m³/h) et les captages dans la région de La Roche-en-Ardenne (*Figure III.19*) ;
- les mines abandonnées et carrières souterraines, le plus souvent en terrain calcaire, parfois dans les craies. Exemple : la mine de Vedrin (1000-1500 m³/h) ;
- les carrières à ciel ouvert. Exemples : les carrières d'Ecaussinnes (jusqu'à 1000 m³/h) et de Ligny (jusqu'à 1200 m³/h) ;
- les galeries captantes à écoulement gravitaire, dans les calcaires du Condroz, les craies de Hesbaye, les grès dévoniens, les sables bruxelliens et d'autres. Exemples : les galeries de la CILE (Compagnie Intercommunale Liégeoise des Eaux) dans le bassin du Geer (1700 m³/h) et les galeries souterraines de Vivaqua à Modave (de 2000 à 3000 m³/h) (*Figure III.20*) ;
- les sources émergentes, où se rassemble et s'écoule le trop-plein d'un bassin hydrogéologique. Exemple : la source de Tridaine à Rochefort (de 10 à 280 m³/h) (*Figure III.21*) ;
- les puits forés, ouvrages réalisés par sondage ;
- les puits traditionnels, ouvrages réalisés par creusement ;
- les puits naturels.

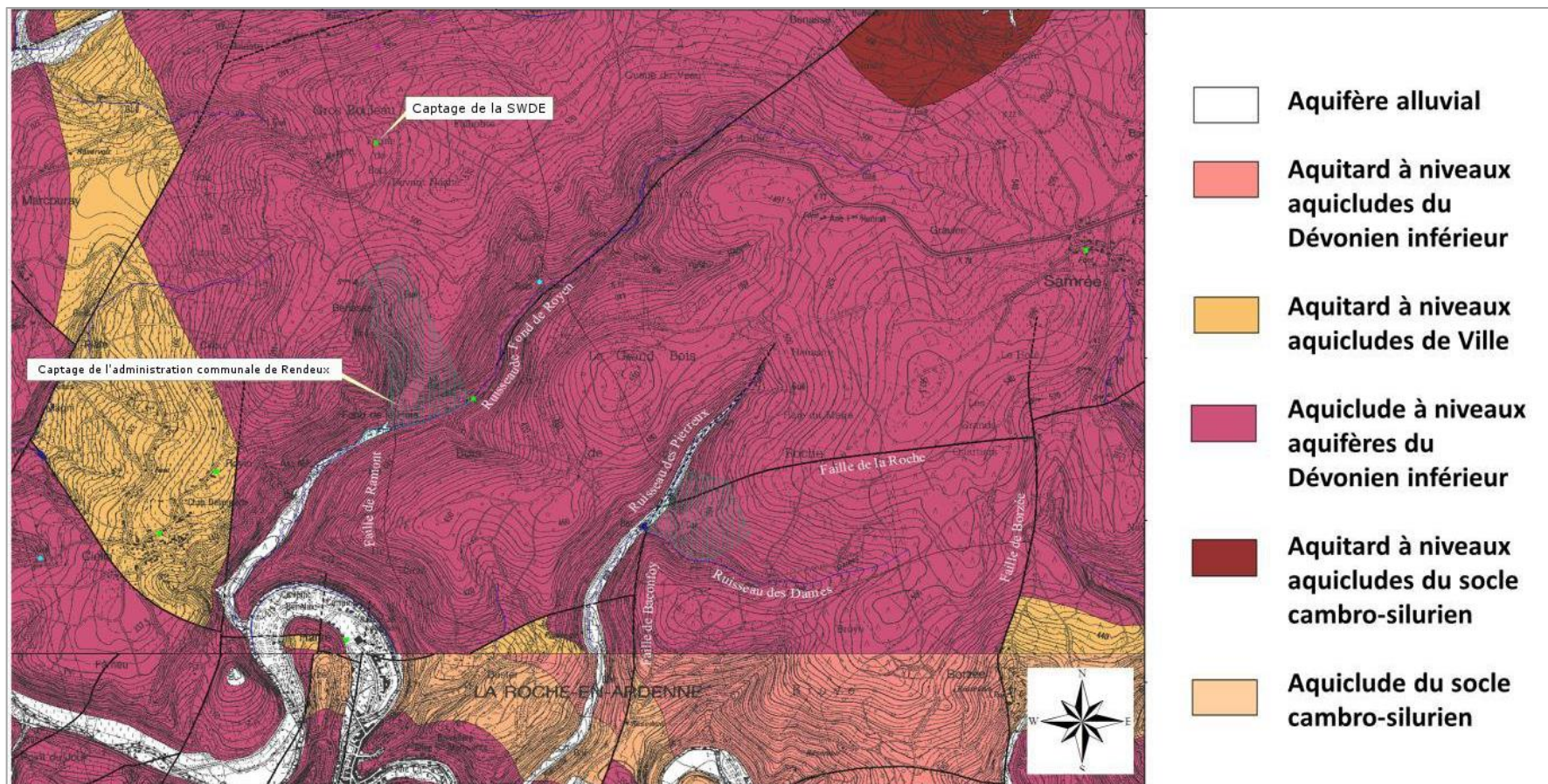


Figure III.19 : Drains exploités par la SWDE et l'administration communale de Rendeux (carte hydrogéologique 49-7/8 Harzé – La Gleize).

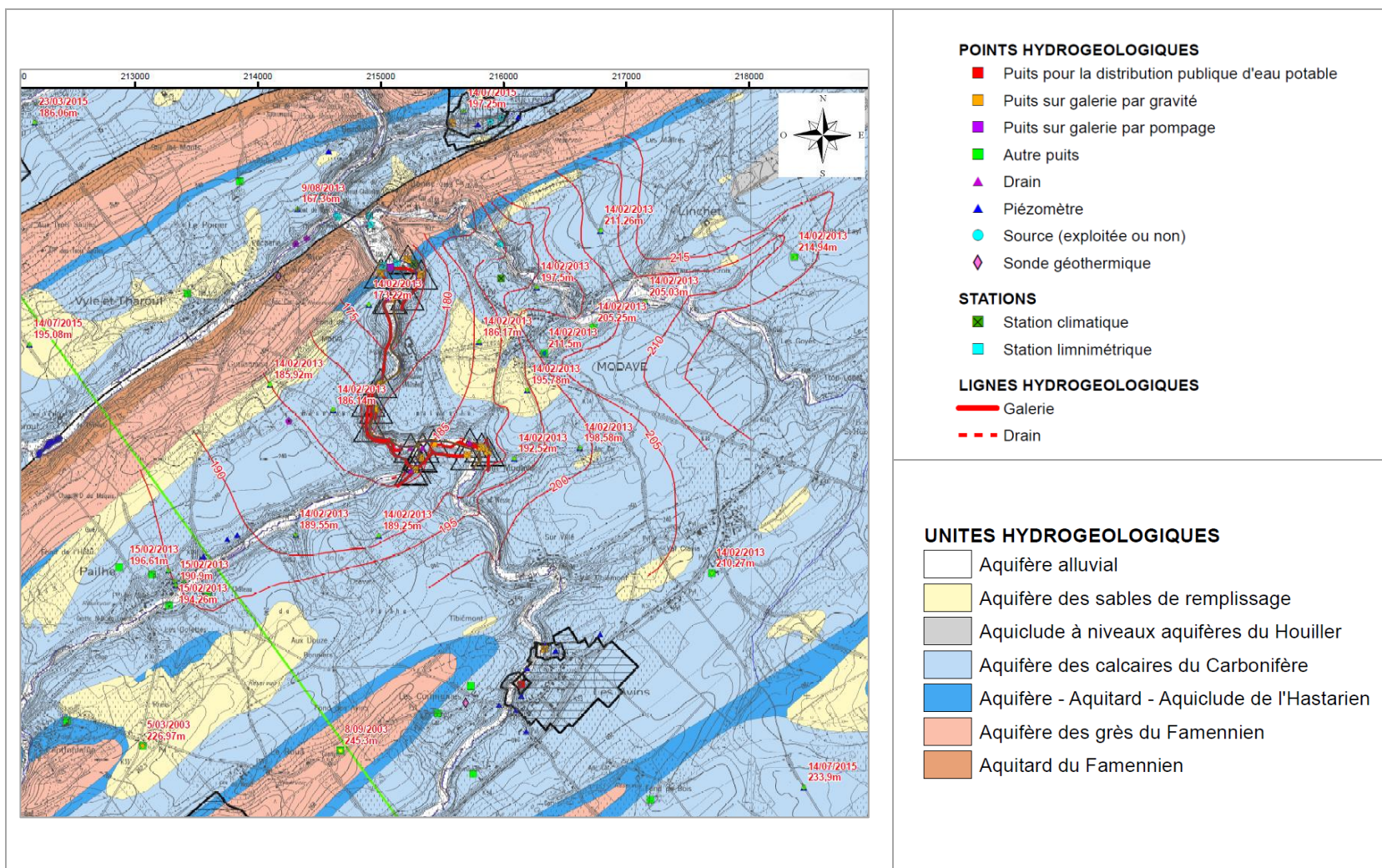


Figure III.20 : Les galeries principales de Modave captent les sources à flanc de coteau le long du Hoyoux (carte hydrogéologique 48-7/8 Modave – Clavier).

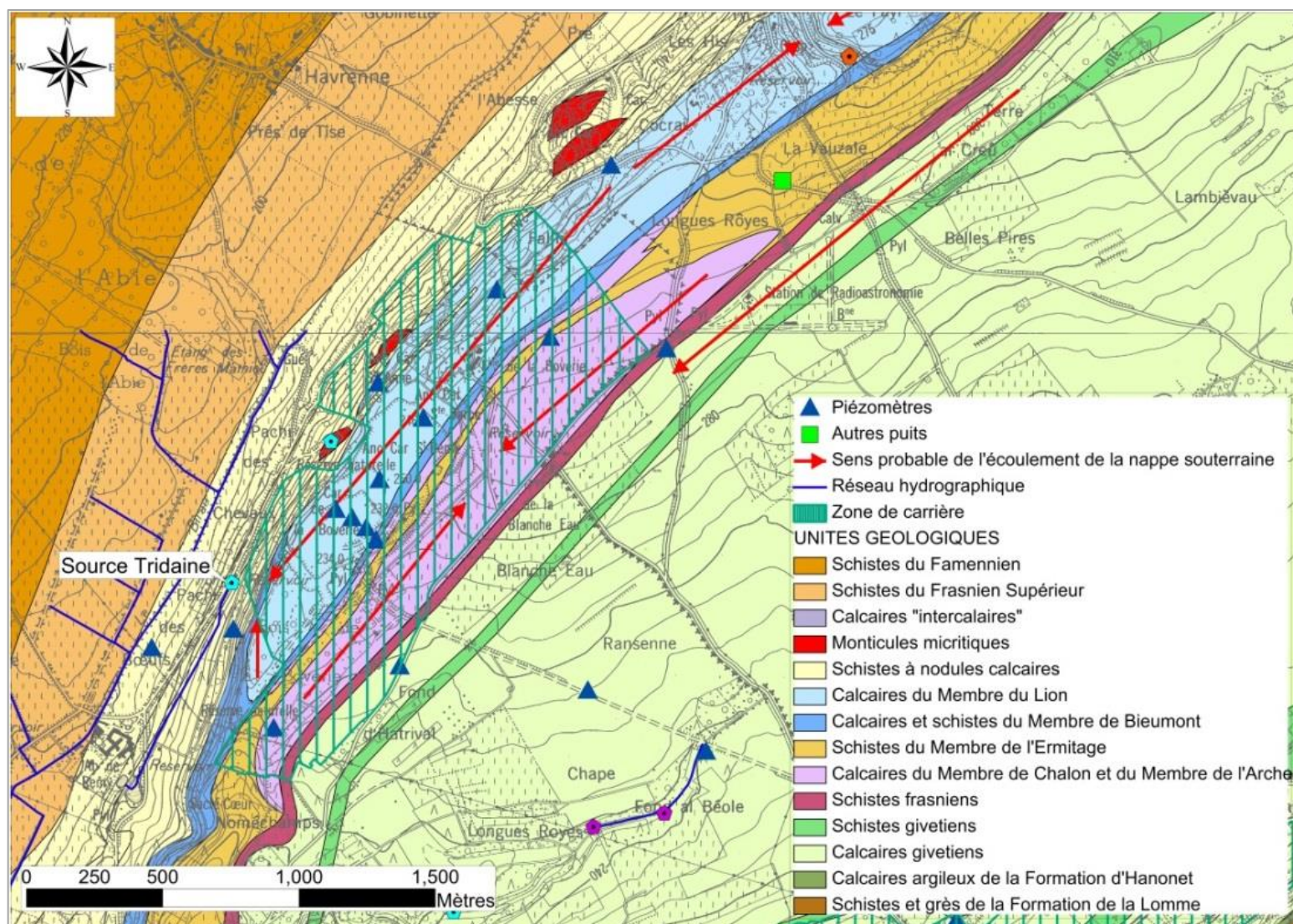


Figure III.21 : La source de Tridaine exploitée par la Ville de Rochefort et l'Abbaye Saint Rémy constitue l'exutoire de l'aquifère des calcaires frasnien (carte hydrogéologique 59-3/4 Rochefort – Nassogne).

Après avoir compilé les débits annuels pompés dans l'ensemble des captages pour la distribution publique d'eau potable en Région wallonne (au nombre de 893 pour l'année 2013) (*com. pers. Masset 2015*), les captages ont été classifiés en quatre catégories selon différentes gammes de débits horaires (*Figure III.22*).

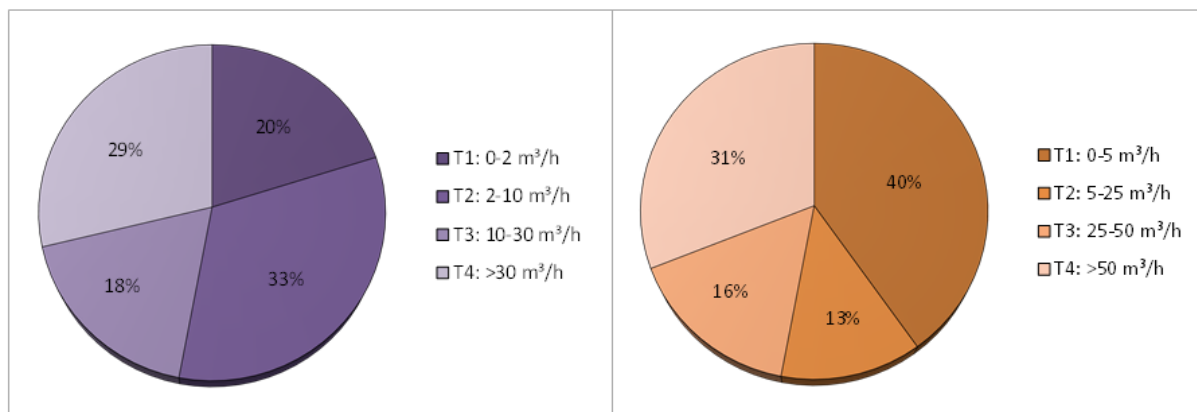


Figure III.22 : Exemples de catégories pour le paramètre de la production des captages pour la distribution publique d'eau potable.

Les catégories qui ont été choisies sont celles pour lesquelles les pourcentages de captages regroupés présentaient les écarts types les plus faibles. Il s'agit des catégories suivantes :

- **T₁** : Production des captages comprise entre 0 et 2 m³/h. On appellera cette catégorie « **production inférieure à 2 m³/h** » ;
- **T₂** : Production des captages comprise entre 2 et 10 m³/h. On appellera cette catégorie « **production entre 2-10 m³/h** » ;
- **T₃** : Production des captages comprise entre 10 et 30 m³/h. On appellera cette catégorie « **production entre 10-30 m³/h** » ;
- **T₄** : Production des captages supérieure à 30 m³/h. On appellera cette catégorie « **production supérieure à 30 m³/h** ».

Remarquons qu'en Wallonie, 15 sociétés, compagnies et intercommunales réalisent plus de 95% de la production d'eau souterraine potabilisable (79% par la SWDE, Vivaqua (la Compagnie de production et de distribution d'eau potable bruxelloise) et la CILE) ; les 5% de la production restant sont réalisés par 41 administrations ou régies communales (*Figure III.23*).

Notons également que certains ouvrages pour la production d'eau potable sont plus sensibles que d'autres au rabattement de la nappe souterraine suite à la mise en place d'exhaure dans une carrière. En effet, les drains et les galeries gravitaires, implantés dans la partie superficielle du sol, verront leur débit diminuer plus rapidement que des puits dans lesquels l'eau souterraine est captée plus profondément par pompage.

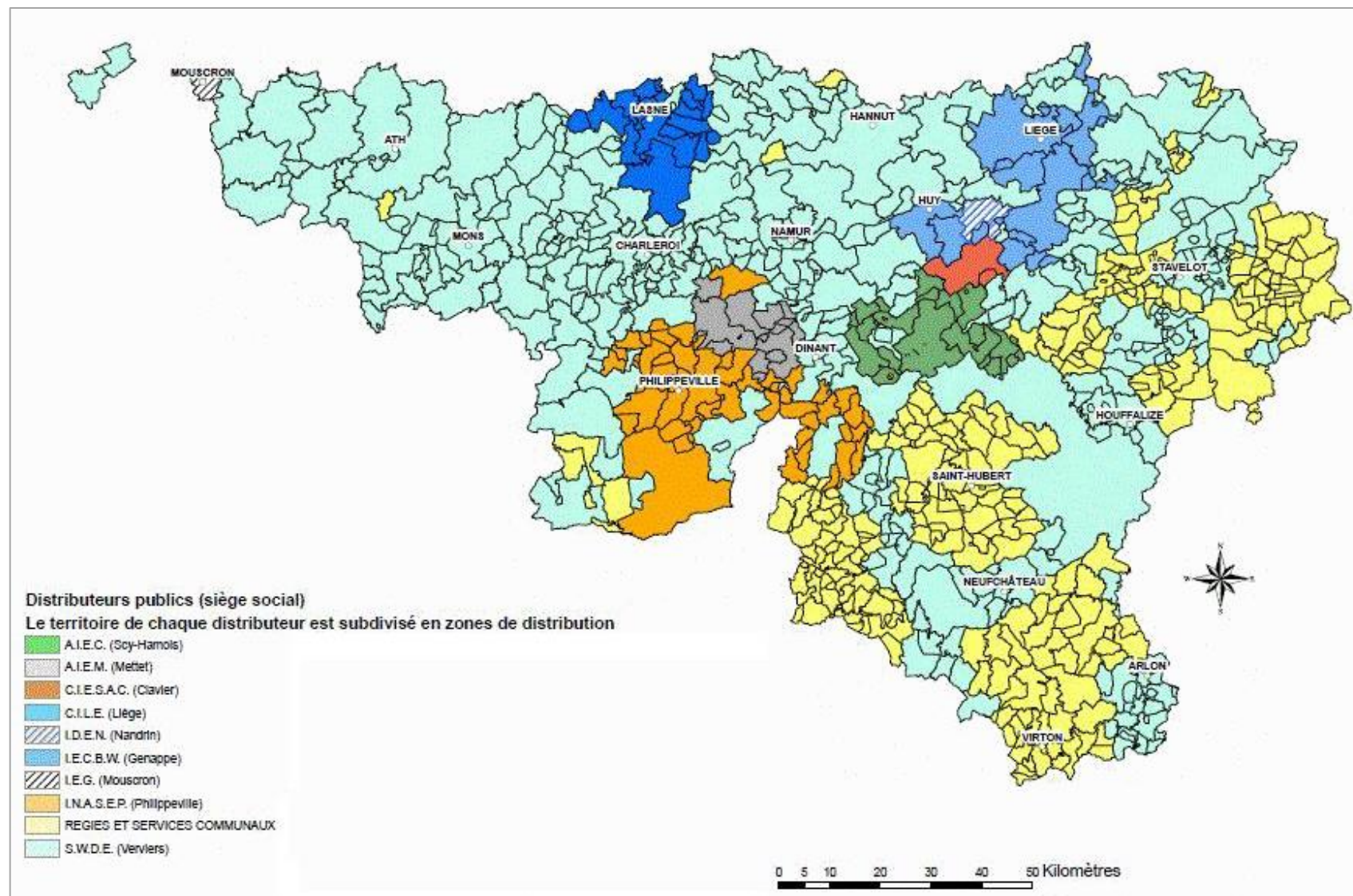


Figure III.23 : Structure de la distribution publique d'eau en Wallonie (<http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas/>).

Si l'on classe l'ensemble des sites carriers wallons selon ce paramètre, on obtient la répartition suivante (*Figure III.24*). On constate que presque les deux tiers des sites carriers sont ouverts dans des formations hydrogéologiques dans lesquels les volumes d'eau pompés sont inférieurs à 2 m³/h.

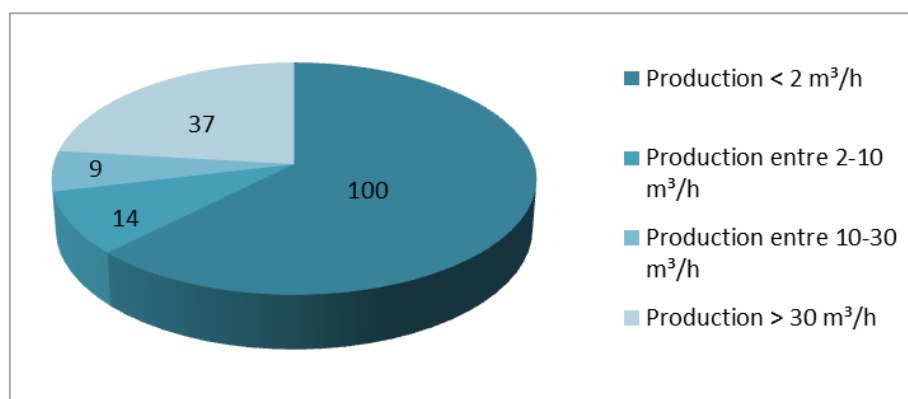


Figure III.24 : Répartition des carrières wallonnes dans les quatre catégories du paramètre « production des captages ».

III.2.3 Potentiel qualitatif de l'eau souterraine

Le distributeur doit prélever des échantillons représentatifs de la qualité des eaux souterraines consommées tout au long de l'année. Ces prélèvements sont répartis dans l'ensemble des réseaux de distribution à la fréquence fixée par le Gouvernement (*Règlement de distribution d'eau 2007*)¹⁴.

La qualité de l'eau souterraine constitue un paramètre économique comprenant les qualités physiques (température, couleur, goût, odeur, turbidité), chimiques et biologiques. Le système SEQ-ESO (Système d'Evaluation de la Qualité des Eaux souterraines) est un outil de référence de caractérisation de la qualité des eaux souterraines en Région Wallonne, basé sur la notion d'altération (*Rentier et al. 2006*). Une altération regroupe les paramètres chimiques apparentés du point de vue de leur nature, de leurs effets et du traitement de l'eau qu'ils nécessitent. Pour chaque paramètre, différents seuils de qualité sont fixés et définissent de cette manière des classes de qualité.

Sur base des mêmes paramètres utilisés pour définir les classes de qualité du système SEQ-ESO, des classes de potabilité ont été déterminées dans le cadre de cette étude (**paramètre L**) :

- **L₁** : Eau à hauts risques. On appellera cette catégorie « **eau à hauts risques** » ;
- **L₂** : Eau potabilisable. On appellera cette catégorie « **eau nécessitant un traitement** » ;
- **L₃** : Eau de bonne qualité. On appellera cette catégorie « **eau de bonne qualité** » ;
- **L₄** : Eau de qualité exceptionnelle. On appellera cette catégorie « **eau de qualité exceptionnelle** ».

¹⁴ <http://environnement.wallonie.be/legis/eau/eaali017.htm>

Dans nos régions à forte densité de population, la contamination des nappes aquifères est souvent d'origine anthropique (*Brouyère et al. 2007*). En effet, les activités humaines peuvent altérer la composition naturelle de l'eau souterraine par le dépôt ou la diffusion de matière microbienne et de produits chimiques (nitrates et pesticides) à la surface du sol et dans les sols.

Dans les aquifères carbonatés, une pollution peut avoir un accès direct à l'eau souterraine via les pertes karstiques notamment. Elle ruisselle puis s'injecte directement dans la roche sans avoir pu être filtrée. Des éléments indésirables peuvent également percoler par accident à partir de friches industrielles dans des aquifères vulnérables, dépourvus de terrains de couverture en surface. On parle alors dans notre classification d'**eau à hauts risques**. Ces eaux, telles que celles contenues dans les calcaires dévonien, présentent déjà souvent des problèmes qualitatifs.

Outre les contaminations anthropiques, les eaux souterraines contiennent naturellement des produits indésirables tels que des particules en suspension, des sels dissous ou des germes. Selon leur qualité, ces eaux sont alors mélangées avec une autre eau moins concentrée et/ou subissent un processus de potabilisation plus ou moins complexe. Il est donc indispensable de disposer d'analyses d'eau précises (analyses physico-chimiques et bactériologiques) afin de bien déterminer et dimensionner les étapes de traitement nécessaires à la potabilisation.

Généralement, les eaux souterraines pompées en Wallonie répondent aux normes de potabilité sans risque de dégradation. Elles sont dites de **bonne qualité** et leur traitement peut se limiter à une chloration. Il s'agit par exemple des eaux pompées par Vivaqua dans le Condroz. Certains cas particuliers peuvent s'avérer plus délicats à traiter dû à une forte turbidité, la présence de fer ou de manganèse, un pH bas, une dureté élevée, etc. et imposer des étapes de traitement supplémentaires. On parle alors dans notre classification d'**eau nécessitant un traitement**. Il s'agit par exemple des eaux pompées en Hesbaye ou dans des aquifères alluviaux où les eaux souterraines sont en liaison hydraulique avec les eaux de surface.

Les étapes de potabilisation principales sont dès lors :

- la filtration fine ;
- l'échange ionique sur résines (adoucissement de l'eau par déminéralisation) ;
- la stérilisation par rayonnement ultraviolet (germicide) ;
- l'affinage au charbon actif (décontamination des composés organiques tels que les pesticides).

En Europe, les eaux minérales naturelles sont définies par la *Directive européenne 80/777* du 15 juillet 1980, transposée dans le droit national de chaque pays. Elles font l'objet d'une exploitation sous forme de cures thermales et surtout sous forme d'eau vendues en bouteille. Leur composition chimique est stable et ne doit par conséquent subir aucun traitement chimique ; on parle dans notre classification d'**eau de qualité exceptionnelle**.

En Belgique, les eaux minérales sont les suivantes¹⁵ :

- Bru-Chevron ;
- Chaudfontaine ;
- Cristal Monopole (à Aarschot) ;
- Duke (à Chaudfontaine) ;
- Ginstberg (dans les Ardennes flamandes) ;
- Léberg (à Roosdaal) ;
- Ordal ;
- Spa ;
- Spontin Duchesse ;
- Sty (à Céroux-Mousty) ;
- Valvert (à Etalle) ;
- Villers Monopole (la source de Villers-le-Gambon).

Si l'on classe l'ensemble des sites carriers wallons selon ces catégories, on obtient la répartition suivante (*Figure III.25*). On constate que très peu de sites carriers sont ouverts dans des formations hydrogéologiques contenant une eau souterraine ne nécessitant aucun traitement, tandis qu'un quart des sites carriers sont ouverts dans des formations hydrogéologiques contenant une eau souterraine dont le chimisme présente des risques.

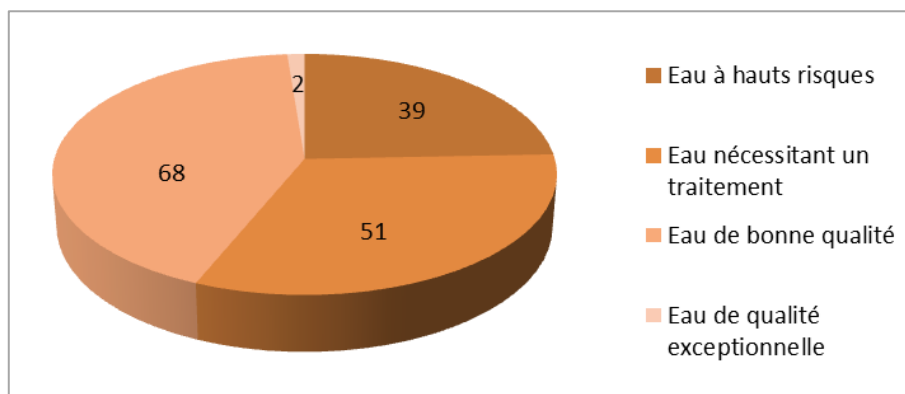


Figure III.25 : Répartition des carrières wallonnes dans les quatre catégories du paramètre « potentiel qualitatif de l'eau souterraine ».

Précisons que dans le cadre de cette étude, nous considérons que la carrière ne constitue pas un risque de contamination. En effet, les carriers ont l'obligation d'appliquer le Code Wallon de Bonne Pratique (CWBP)¹⁶. La législation leur impose dans leur permis d'installer des dalles et des bacs de rétention ainsi que le double encuvement des hydrocarbures, des kits anti-pollution dans les engins roulants, le contrôle permanent des eaux rejetées, etc. En cas d'exhaure, on peut supposer dès lors que toute pollution éventuelle de la nappe sera reprise par le pompage d'exhaure et gérée dans les plus brefs délais.

¹⁵ <http://www.boisson-sans-alcool.com/index.html>

¹⁶ <https://dps.environnement.wallonie.be/home/sols/sols-pollues/code-wallon-de-bonnes-pratiques--cwbp-.html>

Quant à la réalisation d'exhaure en soi, elle n'a pas d'impact direct sur la qualité des eaux souterraines. Néanmoins, suite à la mise en place du cône de rabattement, elle peut engendrer des impacts indirects. En effet, les changements de direction des flux de la nappe qui sont alors induits, peuvent amener une pollution dans des parties de la nappe préalablement non contaminées. Il est alors adéquat d'avoir recours à un modèle mathématique de la nappe pour modéliser le transport de contaminants et examiner l'impact du pompage sur la qualité de l'eau.

III.2.4 Synthèse de la situation en Région wallonne

Les trois paramètres relatifs aux masses d'eau souterraine ainsi définis, une classification synthétique des 160 sites carriers en activité en Wallonie peut être représentée comme suit (Tableau III.2).

		Potentiel qualitatif de l'eau souterraine					
		A hauts risques	Nécessitant un traitement	De bonne qualité	De qualité exceptionnelle		
Productivité de la formation hydrogéologique	> 30 m³/h	1			1	Zone IIa	Position du site vis-à-vis de(s) captage(s)
		3	3	3		Zone IIb	
		1	2	9	1	Alimentation	
		4	6	3		Hors zone	
	10 - 30 m³/h		1			Zone IIa	
			2			Zone IIb	
			1	1		Alimentation	
			1	3		Hors zone	
	2 - 10 m³/h					Zone IIa	
			1			Zone IIb	
				2		Alimentation	
		5	1	5		Hors zone	
	< 2 m³/h					Zone IIa	
		1		3		Zone IIb	
		2	1	6		Alimentation	
		22	32	33		Hors zone	

Tableau III.2 : Classification des 160 sites carriers en activité en Wallonie selon les paramètres spécifiques aux masses d'eau souterraine.

On constate que pratiquement les deux tiers des sites carriers wallons (100/160) sont ouverts dans des zones où les captages pour la distribution publique pompent à faible débit. De plus, la plupart de ceux-ci (87/100) ne se situent pas directement dans leur zone d'alimentation et donc encore moins dans leurs zones de protection. Néanmoins, un sixième des sites carriers (24/160) est exploité à proximité de captages pour la distribution publique pompant à haut débit.

III.3 CONCLUSION

Dans le cadre d'une contextualisation hydrogéologique, un outil de classification des sites carriers a été conçu sur base de six paramètres propres au site carrier (le contexte hydrogéologique, le contexte géologique et le contexte piézométrique) et à la masse d'eau souterraine concernée par l'exploitation du site carrier (la position relative du site carrier et des captages, la production des captages et le potentiel qualitatif de l'eau souterraine).

Dans un souci d'homogénéisation, chaque paramètre a été subdivisé en quatre catégories. L'ensemble ainsi obtenu est composé de 4096 (4^6) combinaisons théoriques des paramètres. Cependant, on constate que l'association de certaines catégories est concrètement impossible pour un site carrier donné. En effet, il est invraisemblable qu'un captage implanté dans une formation aquiclude (H_1) par exemple pompe un débit d'eau souterraine supérieur à 30 m³/h (T_4). Dès lors, on réduit l'ensemble des combinaisons théoriques de 4096 à 3227.

Les catégories sont pour la plupart basées sur des critères quantifiables continus même si les catégories sont nominatives. En effet, malgré que certains des paramètres soient quantifiables, la plupart des sites carriers exploitent des roches cohérentes, telles que les calcaires et les grès, qui présentent de très fortes hétérogénéités, ce qui ne rend pas aisé la division d'un paramètre en catégories distinctes. Dès lors, il ne s'agit pas d'une erreur de jugement mais de la perception du paramètre qu'aura un scientifique par rapport à un autre lorsqu'il classera une carrière dans une catégorie plutôt que dans une autre.

Ensuite, nous avons procédé à la classification des 160 sites carriers wallons en activité. Il en ressort que presque les **trois quarts exploitent des roches calcaires, plus de la moitié exploite sous le niveau de la nappe et un sixième est sujet à une interaction avec des captages pour la distribution publique de grande importance.**

IV ETABLISSEMENT D'UN INDICE D'INTERACTION

IV.1 EQUATION D'INTERACTION

Afin d'évaluer l'interaction entre l'activité extractive et l'exploitation des eaux souterraines, nous avons établi dans un premier temps un indice mathématique basé sur l'équation utilisée dans l'évaluation des risques naturels de type tremblement de terre, glissement de terrain, inondation, etc. (Dauphiné 2003) :

$$\text{Risque} = \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité} \text{ (Equation IV.1)}$$

***Aléa** : phénomène ou manifestation naturelle - ou non lorsque engendré par l'homme - physique qui dans des conditions particulières peut mener à un dommage pour l'homme et/ou l'environnement. Les perturbations qu'un aléa induit sont soit transitoires, soit permanentes. Lorsque les dégradations sont irréversibles, cela peut mener à la destruction des systèmes qu'elles affectent.*

***Vulnérabilité** : notion subjective qui exprime le niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur des enjeux, c'est-à-dire les domaines affectés par un aléa donné.*

***Risque** : menace qu'un événement intempestif dangereux dû à un phénomène naturel appelé aléa ait des effets dommageables, imprévus ou mal venus, sur les aménagements, les ouvrages et les personnes, les enjeux, plus ou moins graves, voire catastrophiques, selon leur vulnérabilité.*

Le risque, produit d'un aléa complexe et d'une vulnérabilité analytique ou synthétique, est une notion générale mal définie. Il est dès lors préférable de définir le risque d'une façon plus globale :

$$\text{Risque} = f(\text{Aléa}, \text{Vulnérabilité}, p\%) \text{ (Equation IV.2)}$$

Le symbole f sera utilisé pour dénoter une relation fonctionnelle générique entre les variables. Quant au $p\%$, il représente la probabilité d'occurrence de l'aléa, c'est-à-dire la limite de la fréquence relative de cet événement lorsque les observations deviennent de plus en plus nombreuses.

Dans la présente étude, l'aléa sera assimilé à l'activité extractive, reprise par les paramètres relatifs à la carrière et la vulnérabilité sera assimilée à l'exploitation des eaux souterraines, reprise par les paramètres relatifs à la masse d'eau souterraine. Le terme d'**interaction** sera privilégié à celui de risque, qui convient mieux au problème étudié. En outre, il s'agit ici d'un risque anthropique et pas naturel.

$$\text{Interaction} = f(\text{Carrière}, \text{Masse d'eau souterraine}) \text{ (Equation IV.3)}$$

Le terme de la probabilité d'occurrence de l'aléa présent dans l'équation IV.2. peut être négligé ici car il est de 100% à partir du moment où la carrière existe.

Les trois paramètres spécifiques au site carrier définis précédemment fournissent un indice que l'on appellera « **indice carrière** » :

$$\text{Indice carrière} = f(H, G, P) \text{ (Equation IV.4)}$$

Tandis que les trois paramètres spécifiques aux masses d'eau souterraine, fournissent un indice que l'on appellera « **indice masse d'eau souterraine** » :

$$\text{Indice masse d'eau souterraine} = f(C, T, L) \text{ (Equation IV.5)}$$

La combinaison des six paramètres va fournir un indice d'interaction capable de servir d'aide à la décision quant au degré d'investigation de l'étude d'incidence nécessaire pour l'exploitation d'un site carrier :

$$\text{Interaction} = f(H, G, P, C, T, L) \text{ (Equation IV.6)}$$

Au départ, les paramètres de la carrière et de la masse d'eau souterraine ont été combinés de manière similaire à la méthode DRASTIC (Zwahlen 2004), c'est-à-dire en additionnant simplement l'ensemble des paramètres, auxquels a été attribuée une valeur plus ou moins grande. Le contexte piézométrique jouant selon nous un rôle plus déterminant dans l'impact sur les ressources en eaux souterraines, sa pondération avait été doublée. Toutefois, il s'est avéré que cette décision était relativement subjective.

Dès lors, nous avons décidé de collaborer avec des collègues mathématiciens de l'Université de Namur engagés dans **NaXys** (Namur center for complex systems)¹⁷ : J. Barthélemy, T. Carletti, M. Moriamé et A. Sartenauer, pour procéder à la pondération des paramètres d'une manière scientifiquement plus pertinente.

IV.2 MODÈLES DE CALCUL

Nous avons fourni à nos collègues mathématiciens l'ensemble des 3227 combinaisons théoriques possibles des paramètres pour lesquels nous avons estimé le degré d'interaction : faible, moyen, fort et très fort. Ces chercheurs ont ensuite eu recours à deux méthodes différentes pour combiner ces paramètres dans l'équation d'interaction. Chacune présentant un avantage par rapport à l'autre. Les deux ont été retenues et sont explicitées ci-dessous.

IV.2.1 Modèle des choix discrets

Premièrement, ils ont utilisé un modèle probabiliste de classification statistique : le **modèle des choix discrets** (Train 2009).

Un modèle de choix discrets décrit, explique, et prédit le choix d'un agent parmi un ensemble fini, complet et exhaustif d'alternatives discrètes. L'unité de prise de décision (l'agent) est supposée être une personne, bien que les concepts soient applicables de manière plus générale. En effet, dans la présente étude, les choix sont « réalisés » par des carrières et les alternatives possibles sont les différentes combinaisons des paramètres de l'indice carrière et de l'indice masse d'eau souterraine.

¹⁷ <https://www.unamur.be/sciences/naxys>

Un modèle de choix discrets met statistiquement en relation le choix fait par chaque carrière avec les attributs de celle-ci et les attributs des alternatives disponibles pour la carrière. Le modèle estime la probabilité qu'une carrière « choisisse » une alternative particulière. Le modèle sera également utilisé pour prévoir la modification de choix de la carrière suite à des changements d'un attribut d'une ou de plusieurs alternatives.

IV.2.1.1 Ensemble de choix

On appelle ensemble de choix l'ensemble des alternatives disponibles pour une carrière. Dans un modèle de choix discrets, cet ensemble de choix doit répondre aux trois exigences suivantes :

- les alternatives doivent être mutuellement exclusives, c'est-à-dire que choisir une alternative signifie ne choisir aucune autre alternative. Cette exigence implique que la carrière ne choisit qu'une alternative issue de l'ensemble ;
- l'ensemble des alternatives doit être exhaustif, c'est-à-dire que l'ensemble inclut toutes les alternatives possibles. Cette exigence implique que la carrière « choisit » nécessairement une alternative issue de l'ensemble ;
- l'ensemble doit contenir un nombre fini d'alternatives. Cette troisième exigence permet de faire la distinction entre l'analyse de choix discrets et l'analyse de régression dans laquelle la variable dépendante peut (théoriquement) prendre un nombre infini de valeurs.

IV.2.1.2 Probabilités de choix

Un modèle de choix discrets spécifie la probabilité qu'une carrière choisisse une alternative particulière. La probabilité est exprimée comme une fonction des variables observées qui met en rapport les alternatives avec la carrière. Dans sa forme générale, la probabilité qu'une carrière n choisisse une alternative i est exprimée ainsi :

$$P_{ni} \equiv \text{Prob}(\text{Carrière } n \text{ choisit alternative } i) = F(x_{ni}, x_{nj}(j \neq i), s_n, \beta) \text{ (Equation IV.7)}$$

- x_{ni} est un vecteur des attributs de l'alternative i rencontrée par une carrière n ;
- $x_{nj}, j \neq i$ est un vecteur des attributs des autres alternatives (autres que i) rencontrées par une carrière n ;
- s_n est un vecteur des caractéristiques d'une carrière n ;
- β est un ensemble de paramètres donnant les effets des variables sur les probabilités, qui sont estimées statistiquement.

IV.2.1.3 Modèles RUM (Random Utility Models)

Un modèle de choix discrets peut être dérivé de la théorie de l'utilité. Cette dérivation est utile pour trois raisons :

- elle donne une signification précise aux probabilités P_{ni} ;

- elle motive et distingue les spécifications du modèle alternatif, par exemple, le choix d'une forme fonctionnelle pour F ;
- elle fournit la base théorique pour le calcul des changements dans les attributs des alternatives.

U_{ni} est l'utilité qu'une carrière n obtient en choisissant l'alternative i . Le comportement de la carrière est de maximiser l'utilité, c'est-à-dire que la carrière n choisit l'alternative qui fournit la plus grande utilité. Le choix de la carrière est désigné par des variables binaires, y_{ni} , pour chaque alternative :

$$y_{ni} = \begin{cases} 1, & \text{si } U_{ni} > U_{nj}, \quad j \neq i, \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

Considérons maintenant le chercheur qui examine le choix. Le choix de la carrière dépend de plusieurs facteurs, certains que le chercheur observe et d'autres que le chercheur n'observe pas. L'utilité que la carrière obtient suite à son choix d'une alternative est décomposée en une partie qui dépend des variables que le chercheur observe et une autre qui dépend des variables que le chercheur n'observe pas.

Dans un modèle linéaire, cette décomposition est exprimée comme ceci :

$$U_{ni} = V_{ni} + \varepsilon_{ni} \text{ (Equation IV.8)}$$

- V_{ni} est l'utilité représentative (ou systématique) perçue par une carrière n pour l'alternative i ;
- ε_{ni} capture l'impact de tous les facteurs non observés qui affectent le choix de la carrière.

La probabilité de choix est alors :

$$\begin{aligned} P_{ni} &= \text{Prob}(y_{ni} = 1) = \text{Prob}(U_{ni} > U_{nj}, j \neq i) \\ &= \text{Prob}(V_{ni} + \varepsilon_{ni} > V_{nj} + \varepsilon_{nj}, j \neq i) \\ &= \text{Prob}(\varepsilon_{nj} - \varepsilon_{ni} < V_{ni} - V_{nj}, j \neq i) \text{ (Equation IV.9)} \end{aligned}$$

La probabilité de choix est la probabilité que les termes $\varepsilon_{nj} - \varepsilon_{ni}$ (qui sont aléatoires du point de vue du chercheur, à partir du moment où il ne les observe pas) soient en dessous des quantités respectives $\forall j \neq i : V_{ni} - V_{nj}$.

On remarque que P_{ni} ne dépend que des différences $U_{ni} - U_{nj}$; dès lors, une constante arbitraire peut être ajoutée aux U sans en modifier la probabilité.

La probabilité qu'une carrière choisisse une alternative particulière est déterminée en comparant l'utilité de choisir cette alternative à l'utilité de choisir d'autres alternatives.

$$\begin{aligned}
P_{ni} &= Prob(y_{ni} = 1) \\
&= Prob(U_{ni} > U_{nj}, \forall j \neq i) \\
&= Prob(U_{ni} - U_{nj} > 0, \forall j \neq i) \text{ (Equation IV.10)}
\end{aligned}$$

Étant donné que l'utilité n'a pas d'unités, il est nécessaire de normaliser l'échelle des utilités. Dès lors, une des alternatives est associée à une utilité à laquelle est attribuée la valeur de 0, que l'on appellera l'alternative de base. Généralement, l'utilité représentative s'écrit sous la forme suivante :

$$V_{ni} = \beta_i z_{ni} \text{ (Equation IV.11)}$$

- z_{ni} est un vecteur des variables observées relatives à l'alternative i pour une carrière n qui dépend des attributs de l'alternative, x_{ni} , qui a peut-être interagi avec les attributs de la personne, s_n , de telle sorte qu'il peut être exprimé comme ceci : $z_{ni} = z(x_{ni}, s_n)$ pour une fonction numérique z ;
- β est un vecteur des coefficients des variables observées correspondant.

IV.2.1.4 Choix du modèle Logit

Différentes spécifications de la composante aléatoire ε_{ni} mènent à différents modèles de choix discrets, dont le modèle Logit, choisi dans le cadre de la présente étude. Celui-ci est obtenu en supposant que les vecteurs β et z_{ni} sont indépendants et qu'il n'y a donc pas de corrélation entre les alternatives. Il suit une distribution de Gumbel standard identique (qui est un cas particulier de la distribution de valeur extrême généralisée de Fisher-Tippett) dont la fonction de distribution cumulative est définie par (Gumbel 1954) :

$$F(\varepsilon_{ni}) = e^{-e^{-\varepsilon_{ni}}} \text{ (Equation IV.12)}$$

Par conséquent, il peut être démontré que la probabilité associée à chaque alternative a la forme suivante (Ben-Akiva et Lerman 1985) :

$$P_{ni} = \frac{e^{V_{ni}}}{\sum_k e^{V_{kn}}} \text{ (Equation IV.13)}$$

Le vecteur de coefficients $\hat{\beta}$ pour ce modèle Logit est ensuite estimé par l'approche de vraisemblance maximale (L), c'est-à-dire :

$$\hat{\beta} = \arg \max_{\beta} L(\beta) = \sum_n \sum_i y_{ni} \left(\beta^T z_{ni} - \ln \sum_j e^{\beta^T z_{nj}} \right) \text{ (Equation IV.14)}$$

où la variable factice y_{ni} est égale à 1 si la carrière n choisit effectivement i , ou est égal à 0 dans le cas contraire et où $\beta^T z_{nj}$ est le produit scalaire entre les vecteurs β et z_{nj} .

La qualité du modèle est donnée par la valeur de l'indice du rapport de probabilité $\rho^2 \in [0,1]$ défini ainsi :

$$\rho^2 = 1 - \frac{L(\hat{\beta})}{L(0)} \text{ (Equation IV.15)}$$

Si le modèle est capable de reproduire parfaitement le choix des carrières, alors l'indice est égal à 1. Inversement, si le modèle ne vaut pas mieux qu'un modèle dans lequel tous les coefficients auraient été fixés à 0, l'indice sera égal à 0. Puisque la valeur de l'indice augmente avec le nombre de paramètres, le $\bar{\rho}^2$ ajusté a été introduit pour comparer le modèle avec différents nombres de paramètres. Il est défini de la manière suivante :

$$\bar{\rho}^2 = 1 - \frac{L(\hat{\beta}) - K}{L(0)} \text{ (Equation IV.16)}$$

où K représente le nombre des paramètres estimés.

IV.2.1.5 Obtention de probabilités

L'ensemble de choix A comporte les quatre degrés d'investigation qui ont été établis pour un indice d'interaction entre les carrières et les ressources en eau souterraine faible, moyen, fort ou très fort (*chapitre V*) :

$$A = \{low, medium, high, very high\}.$$

L'alternative *low* a été choisie pour constituer l'alternative de base. Les alternatives sont indépendantes. Les utilités associées à chacune d'entre elles seront respectivement notées V_l, V_m, V_h, V_{vh} .

Comme il est impossible de complètement caractériser une carrière, certaines zones de l'exploitation pouvant être moins faciles à étudier par exemple, il en résulte des attributs cachés pour l'observateur. Dès lors, les hypothèses du modèle de choix discrets Logit sont remplies et peuvent être appliquées à notre étude.

Les fonctions des utilités du modèle complet englobent chacune les paramètres de l'indice carrière et de l'indice masse d'eau souterraine, qui s'expriment comme suit :

$$V_l = 0 \text{ (Equation IV.17)}$$

$$V_m = \beta^m + \sum_i^4 (\beta_{g,i}^m G_i + \beta_{h,i}^m H_i + \beta_{p,i}^m P_i + \beta_{c,i}^m C_i + \beta_{t,i}^m T_i + \beta_{l,i}^m L_i) \text{ (Equation IV.18)}$$

$$V_h = \beta^h + \sum_i^4 (\beta_{g,i}^h G_i + \beta_{h,i}^h H_i + \beta_{p,i}^h P_i + \beta_{c,i}^h C_i + \beta_{t,i}^h T_i + \beta_{l,i}^h L_i) \text{ (Equation IV.19)}$$

$$V_{vh} = \beta^{vh} + \sum_i^4 (\beta_{g,i}^{vh} G_i + \beta_{h,i}^{vh} H_i + \beta_{p,i}^{vh} P_i + \beta_{c,i}^{vh} C_i + \beta_{t,i}^{vh} T_i + \beta_{l,i}^{vh} L_i) \text{ (Equation IV.20)}$$

Le vecteur β constitue le vecteur des paramètres inconnus devant être estimés. Les termes $\beta^k, k \in \{l, m, h, vh\}$, correspondent aux constantes spécifiques des alternatives capturant les effets moyens des composantes non observées. Les paramètres de la carrière sont codés comme des variables logiques avec des valeurs de 0, si la carrière ne présente pas cette caractéristique, ou de 1, si la carrière présente cette caractéristique. Ainsi :

$$X_i = 1 \Leftrightarrow X_j = 0 \quad \forall j \neq i, X \in \{G, H, P, C, T, L\}.$$

Ceci signifie que les modalités de chaque paramètre sont mutuellement exclusives. Les probabilités que la carrière choisisse une des 64 alternatives existantes possibles s'expriment

de la manière suivante. Pour plus de facilité, les termes V_l, V_m, V_h, V_{vh} sont remplacés par L, M, H, VH dans les équations :

$$P(L) = \frac{e^L}{e^L + e^M + e^H + e^{VH}} \text{ (Equation IV. 21)}$$

$$P(M) = \frac{e^M}{e^L + e^M + e^H + e^{VH}} \text{ (Equation IV. 22)}$$

$$P(H) = \frac{e^H}{e^L + e^M + e^H + e^{VH}} \text{ (Equation IV. 23)}$$

$$P(VH) = \frac{e^{VH}}{e^L + e^M + e^H + e^{VH}} \text{ (Equation IV. 24)}$$

e est le nombre d'Euler (ou constante de Néper) qui vaut environ 2,71828.

L'estimation et la validation de la probabilité maximale des paramètres du modèle a été réalisée à l'aide du logiciel BIOGEME (Bierlaire 2003) sur l'ensemble des données théoriques.

IV.2.2 Réseau de neurones artificiels

Deuxièmement, les chercheurs mathématiciens de l'Université de Namur ont utilisé un **réseau de neurones artificiels** (Kriesel 2007)¹⁸.

Un réseau de neurones artificiels est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspirée du fonctionnement des neurones biologiques (Blayo et Verleysen 1996). Dans notre cerveau, les neurones constituent un réseau de cellules nerveuses, simples mais nombreuses, qui fonctionnent en parallèle. Ce réseau de neurones peut se réorganiser par lui-même au cours de sa vie ou suite à des influences externes. Il est par conséquent capable d'apprendre des tâches et de compenser les erreurs pouvant survenir. Les ordinateurs, au contraire, possèdent des unités de traitement et de la mémoire mais ne possèdent pas de capacités naturelles d'apprentissage.

De ce fait, les réseaux de neurones sont généralement entraînés par des algorithmes d'apprentissage. Ils sont placés d'une part dans la famille des applications statistiques, qu'ils enrichissent avec un ensemble de paradigmes permettant de créer des classifications rapides, et d'autre part dans la famille des méthodes d'intelligence artificielle auxquelles ils fournissent un mécanisme perceptif indépendant des idées propres de l'implémenteur et fournissant des informations d'entrée au raisonnement logique formel.

IV.2.2.1 Structure d'un réseau de neurones

Le neurone formel est un automate doté d'une fonction de transfert qui transforme les informations en entrée en un résultat de calcul en sortie selon des règles précises (McCulloch et Pitts 1943). En général, le réseau de neurones est composé d'une succession de couches ($l, l+1, l+2$, etc.) dont chacune prend ses entrées sur les sorties de la précédente ($l-1, l, l+1$, etc.).

¹⁸ <http://dkriesel.com/en/tech/snipe>

On parle d'architecture *Feed Forward* (Lisboa 1992). Chaque couche (i) est composée de N_i neurones, prenant leurs entrées sur les N_{i-1} neurones de la couche précédente créant ainsi des liens entre chaque paire de neurones (o_i^l, o_j^{l+1}).

L'efficacité de la transmission des signaux d'un neurone à l'autre peut varier ; on parle de « **poids synaptique** » (Figure IV.1), associé à des connexions spéciales : les synapses. Les N_{i-1} sorties des neurones de la couche $i-1$ entrant dans le neurone j de la couche i sont donc multipliés par ce poids (w_{ij}^l), puis additionnés et comparés avec le seuil du neurone i pour enfin donner la sortie de ce dernier, ce qui est équivalent à multiplier le vecteur d'entrée par une matrice de transformation. Les informations rentrantes passent d'une couche à la suivante à travers une couche cachée en utilisant les seuils d'activation en combinaison avec la fonction de transfert logistique.

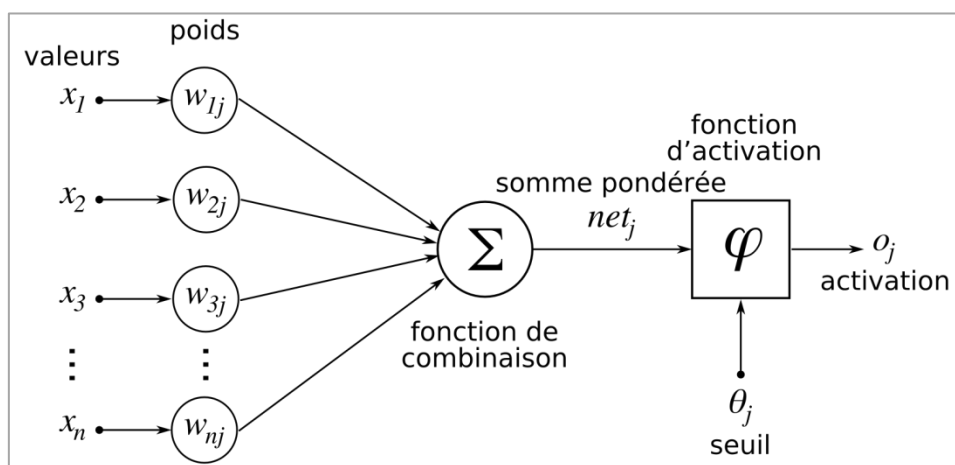


Figure IV.1 : Structure d'un réseau de neurones artificiels. Le neurone calcule la somme de ses entrées puis cette valeur passe à travers la fonction d'activation pour produire sa sortie.

La fonction des réseaux de neurones formels, à l'instar du modèle vivant, est d'opérer rapidement des classifications et d'apprendre à les améliorer. À l'opposé des méthodes traditionnelles de résolution informatique, il ne faut pas construire un programme pas à pas en fonction de la compréhension de celui-ci. Les paramètres importants de ce modèle sont les coefficients synaptiques et le seuil de chaque neurone (θ_j^{l+1}), ainsi que la disposition des neurones. Ce sont eux qui déterminent l'évolution du réseau en fonction des informations d'entrée. Il faut choisir un mécanisme permettant de les calculer et de les faire converger si possible vers une valeur assurant une classification aussi proche que possible de l'optimale. C'est ce qui s'appelle la **phase d'apprentissage du réseau**. Dans un modèle de réseaux de neurones artificiels, apprendre revient donc à déterminer les poids synaptiques les plus adaptés à classer les données présentées.

IV.2.2.2 Importance de l'entraînement

Les réseaux de neurones possèdent un **algorithme « d'entraînement »** les aidant à mettre en œuvre le principe d'induction, c'est-à-dire l'apprentissage par l'expérience. Il s'agit de la démarche inverse de la déduction, par laquelle on tire des connaissances dérivées à partir de connaissances déjà établies. Cet algorithme consiste à modifier les poids synaptiques en fonction d'un jeu de données présenté en entrée du réseau et de l'erreur commise par rapport au calcul attendu. Ainsi, le réseau de neurones, par confrontation avec les données, infère un système de décision intégré, dont le caractère générique est fonction du nombre et de la complexité des cas d'apprentissages rencontrés. Si l'entraînement est correctement réalisé, le réseau est dès lors capable de fournir des réponses en sortie très proches des valeurs d'origine du jeu de données d'entraînement.

IV.2.2.3 Intérêt de la méthode

L'intérêt des réseaux de neurones réside dans leur aptitude à généraliser à partir du jeu de test et ainsi créer une mémoire neuronale. Cependant, le réseau de neurones ne fournit pas toujours de règle exploitable par un humain. En effet, le réseau reste souvent considéré comme une **boîte noire** qui fournit une réponse quand on lui présente des données, mais dont la structure interne reste inconnue et qui ne fournit pas de justification facile à interpréter.

IV.2.2.4 Application du réseau de neurones artificiels

Un réseau de neurones a été créé pour les carrières de Wallonie sur base des quatre catégories de chacun des six paramètres de l'indice carrière et de l'indice masse d'eau souterraine (24 catégories). Les 160 carrières en activité constituant un jeu de données suffisamment grand, celui-ci peut donc être utilisé pour l'entraînement du réseau de neurones créé.

Les 24 nœuds de la couche d'entrée obtenus (*Figure IV.2*) correspondent aux catégories de nos paramètres (H, P, G, C, T, L), codées comme des variables nominales. La couche de sortie quant à elle contient quatre nœuds faisant référence aux quatre niveaux de l'étude hydrogéologique possibles. Dès lors, la règle de décision suivante est appliquée pour déterminer le niveau d'interaction :

$$I = \arg \max_{l, m, h, vh} \{O_l, O_m, O_h, O_{vh}\} \text{ (Equation IV.25)}$$

Où O_l, O_m, O_h, O_{vh} représentent respectivement la valeur du nœud de sortie associé aux niveaux d'interaction « low », « medium », « high » et « very high ».

Le réseau de neurones est entièrement défini par le nombre de couches cachées, le nombre de nœuds présents sur ces couches, les poids des liaisons interconnectant les nœuds et les seuils d'activation. Il a été décidé ici de ne considérer qu'une seule couche cachée.

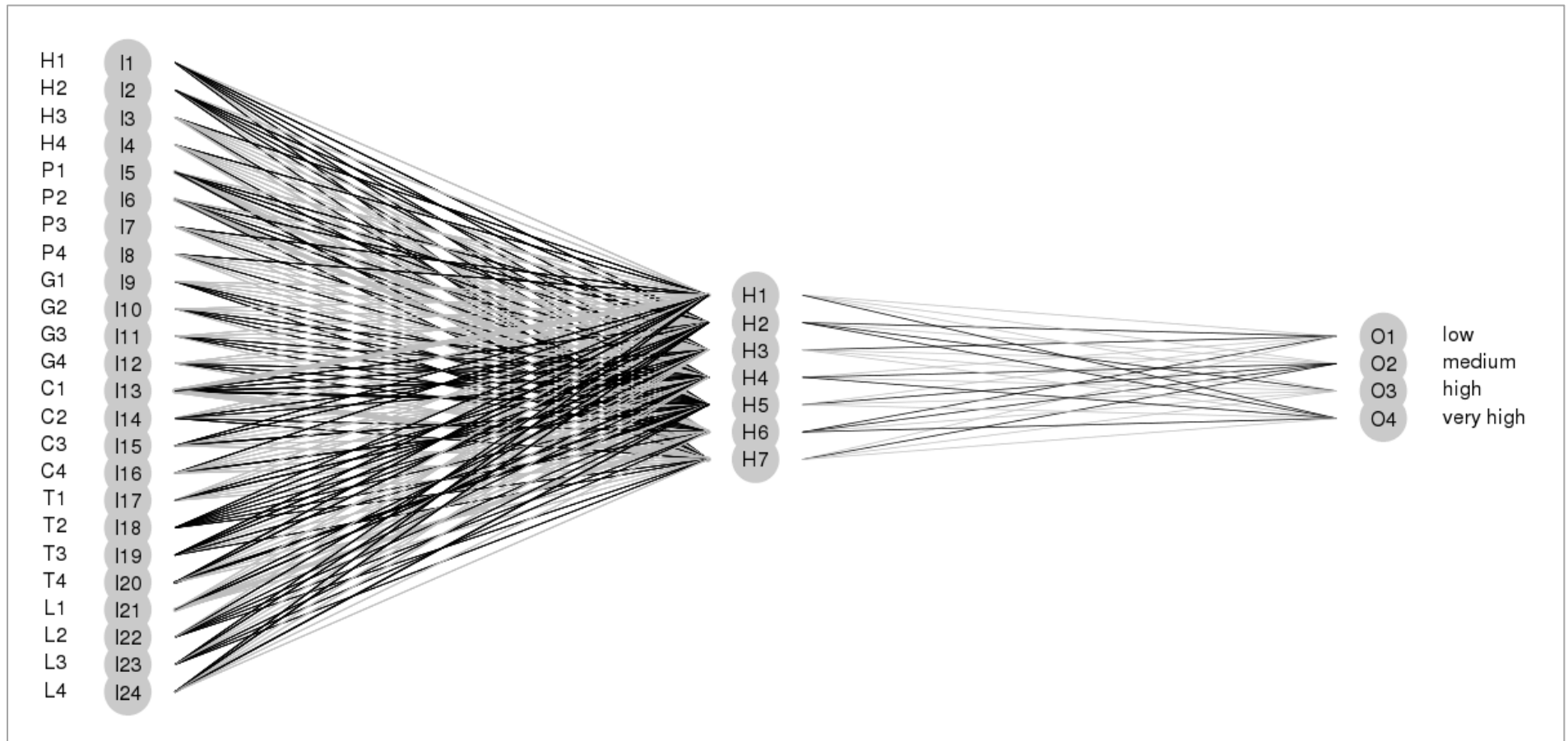


Figure IV.2 : L'architecture du réseau de neurones comporte sept nœuds dans la couche cachée. La règle de décision consiste à sélectionner le nœud de sortie associée à la valeur la plus haute. Une liaison noire indique que le poids associé est positif alors qu'une liaison grise indique que le poids associé est négatif.

Une série de modèles a été testée en faisant varier le nombre de nœuds de cette couche cachée (de 1 à 17 nœuds) afin d'en déterminer le nombre optimal. La performance de chacun des réseaux testés est simplement donnée par le pourcentage de prédiction de l'indice d'interaction correct. Les poids du réseau de neurones ont été optimisés par un algorithme d'apprentissage basé sur une méthode de rétro-propagation stochastique. Cet algorithme permet de déterminer les poids optimaux en comparant les sorties calculées par le réseau avec les valeurs attendues, c'est-à-dire la classe à laquelle une carrière appartient (*Riedmiller et Braun 1993*). En pratique, le package R *neuralnet* a été utilisé (*Fritsch et al. 2015*)¹⁹.

Le nombre de répétitions a été fixé à dix et la fonction d'erreur minimisée à l'aide de l'algorithme d'apprentissage est la somme des erreurs carrées entre le niveau d'interaction prévu et celui attendu pour chacune des carrières. Le processus a été réalisé sur un échantillon aléatoire de 75%, extrait à partir de l'ensemble des données théoriques. La performance du réseau obtenu a ensuite été évaluée sur les 25% des données restantes.

Le pourcentage de prédiction correct observé augmente rapidement d'un nœud à l'autre. Il est de 51,56% au premier nœud caché et de 92,19% au septième nœud. Au-delà de ce seuil, l'impact d'un nœud supplémentaire est plus faible, tout en restant toutefois positif. Dès lors, un réseau de neurones à sept nœuds a été choisi.

Ainsi, en introduisant les caractéristiques d'une nouvelle carrière, le réseau de neurones déterminera le degré d'interaction correspondant en faisant une généralisation à partir des cas qu'il connaît.

IV.2.2.5 Validation du modèle

La qualité du modèle mathématique utilisé dans l'établissement de l'indice d'interaction a été démontrée en appliquant une régression locale aux résultats (*Figure IV.3*). La régression permet d'illustrer la relation entre le nombre de neurones et le pourcentage de prédiction, représentée par la courbe bleue. La zone grisée représente l'intervalle de confiance à 95% de cette courbe, c'est-à-dire, selon la courbe de Gauss, l'intervalle à deux déviations standards ou plus de la moyenne. En effet, le processus d'optimisation comportant une partie aléatoire, les valeurs obtenues pour les paramètres peuvent varier. Autrement dit, un intervalle de confiance à 95% correspond à une probabilité de 95% de recouvrir la vraie valeur du pourcentage de prédiction de l'indice d'interaction. Cette régression confirme que le pouvoir prédictif augmente fortement jusque sept nœuds, suivi d'une faible augmentation.

¹⁹ <https://www.r-project.org/>

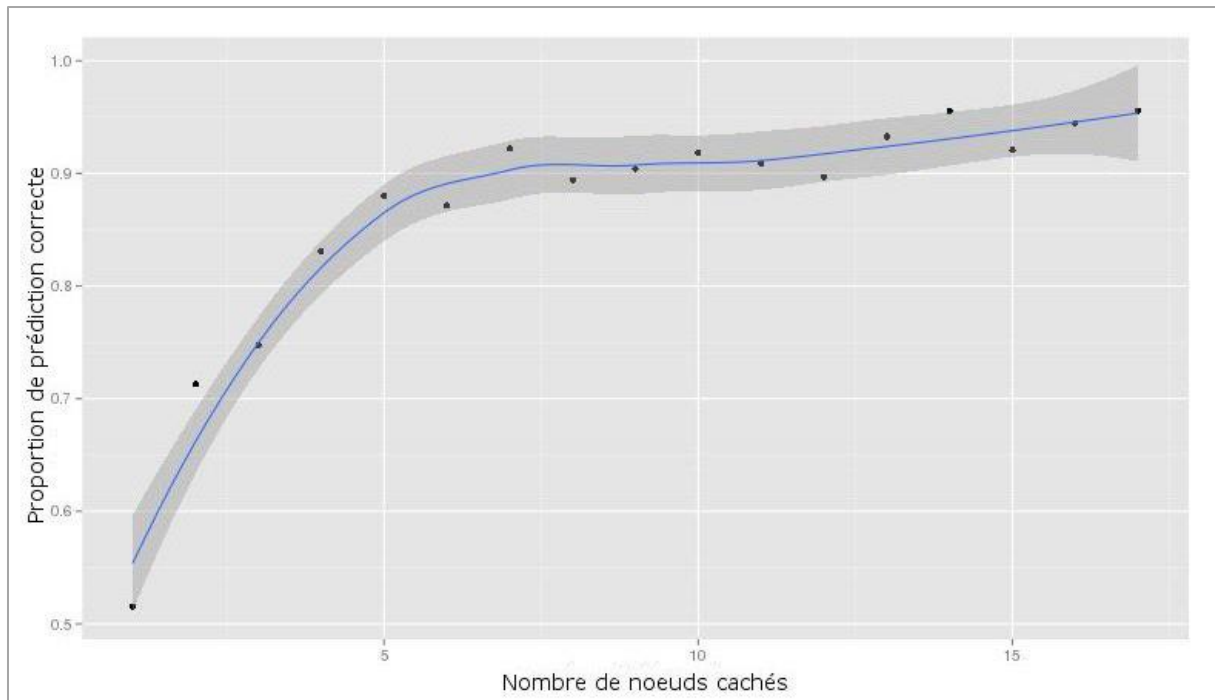


Figure IV.3 : Régression locale des résultats (ligne bleue) avec l'erreur standard (zone grise) définissant la limite de confiance de la régression (com. pers. Barthélemy 2015)

IV.3 APPLICATION DU MODÈLE DES CHOIX DISCRETS

IV.3.1 Calcul de l'indice carrière

Le modèle de choix discrets Logit a été appliqué. Afin que les valeurs de pondération des paramètres puissent être calculées, un niveau de base doit être imposé, sans que cela ne change les prédictions finales. Ainsi, la valeur de 0 a été arbitrairement imposée à la première équation, à la première catégorie de chacun des paramètres dans la deuxième équation, à la deuxième catégorie de chacun des paramètres dans la troisième équation et à la troisième catégorie de chacun des paramètres dans la quatrième équation. Dès lors, les équations obtenues pour l'indice carrière, s'expriment de la manière suivante :

$$L = 0$$

$$M = -7.35 + 0 * H_1 - 0.46 * H_2 + 6.92 * H_3 + 10.8 * H_4 + 0 * P_1 + 1.64 * P_2 + 10.3 * P_3 - 11.7 * P_4 + 0 * G_1 + 2.81 * G_2 - 2.34 * G_3 + 2.43 * G_4$$

$$H = -6.21 - 9.44 * H_1 + 0 * H_2 + 11 * H_3 + 15.6 * H_4 - 10.5 * P_1 + 0 * P_2 - 12.7 * P_3 + 14.2 * P_4 - 4.76 * G_1 + 0 * G_2 + 1.65 * G_3 + 2.12 * G_4$$

$$VH = 22 - 25.6 * H_1 - 22.5 * H_2 + 0 * H_3 + 6.43 * H_4 - 25.9 * P_1 - 16.4 * P_2 + 0 * P_3 + 1.67 * P_4 - 0.49 * G_1 + 0.02 * G_2 + 0 * G_3 + 0.04 * G_4$$

La première idée était d'attribuer à chacun des paramètres de l'indice carrière (H, P et G) une valeur comprise entre 1 à 4 et de leur donner ainsi plus ou moins d'importance dans les équations des indices. En procédant ainsi, la qualité du modèle mathématique était déjà élevée ($\rho^2 = 0,68$). Cependant, il semblait incorrect de multiplier la valeur numérique d'un paramètre alors qu'en réalité celui-ci n'augmentait pas proportionnellement. En effet, attribuer une valeur de 4 au contexte hydrogéologique (formation aquifère carbonaté), par exemple, ne signifie pas que la conductivité hydraulique de la formation considérée est deux fois plus élevée que celle d'une formation hydrogéologique à laquelle aurait été attribuée une valeur de 2 (formation aquitard).

Dès lors, les chercheurs mathématiciens ont proposé de plutôt travailler en **système binaire**. Le système binaire est un système de numération utilisant la base 2 (*Leibniz 1703*). Il s'agit d'attribuer une valeur de 0 ou de 1 aux quatre catégories de chaque paramètre, 0 si le site carrier étudié ne correspond pas à cette catégorie ou 1 s'il correspond à cette catégorie.

Les résultats des équations obtenus sont ensuite insérés dans les équations de probabilité (*Equation IV.21, Equation IV.22, Equation IV.23, Equation IV.24*).

L'équation dont la probabilité est la plus élevée attribue son indice de l'indice carrière au site carrier étudié. L'indice peut soit être faible (low index), moyen (medium index), fort (high index) ou très fort (very high index).

- **Low index** : l'influence de l'activité du site carrier sur les ressources en eaux souterraines est de faible importance ;
- **Medium index** : l'influence de l'activité du site carrier sur les ressources en eaux souterraines est d'importance moyenne ;
- **High index** : l'influence de l'activité du site carrier sur les ressources en eaux souterraines est de forte importance ;
- **Very high index** : l'influence de l'activité du site carrier sur les ressources en eaux souterraines est de très forte importance.

Après avoir calculé l'indice carrière pour l'ensemble des combinaisons théoriques possibles, les tendances dans le tableau ci-dessous ont été observées (*Tableau IV.1*). Les couleurs vert, jaune, orange et rouge ont été respectivement attribuées aux indices faible, moyen, fort et très fort afin de faciliter l'interprétation des tableaux des indices carrière et masse d'eau souterraine.

		Contexte géologique					
		Totalement isolé	Partiellement isolé	Extension locale	Extension régionale		
Contexte hydrogéologique	Aquifère carbonaté					P = N < T (≠NB)	Contexte piézométrique
						P = N < T (=NB)	
						P = N > T	
						P > N	
	Aquifère					P = N < T (≠NB)	
						P = N < T (=NB)	
						P = N > T	
						P > N	
	Aquitard					P = N < T (≠NB)	
						P = N < T (=NB)	
						P = N > T	
						P > N	
	Aquiclude					P = N < T (≠NB)	
						P = N < T (=NB)	
						P = N > T	
						P > N	

Tableau IV.1 : Probabilités de l'indice carrière pour toutes les combinaisons des paramètres.

Dès lors, il est possible de déterminer directement, à l'aide des couleurs du tableau, les probabilités de l'indice carrière pour une nouvelle carrière donnée. Par exemple, une carrière présentant la combinaison des paramètres H_3 , G_1 et P_2 montre une probabilité de 20% de correspondre à un indice carrière « medium », une probabilité de 60% à un indice carrière « high » et de 20% à un indice carrière « very high ».

IV.3.2 Calcul de l'indice masse d'eau souterraine

Les équations obtenues pour l'indice masse d'eau souterraine à l'aide du modèle de choix discrets Logit s'expriment de la manière suivante :

$$L = 0$$

$$M = -9.10 + 0 * C_1 + 5.1 * C_2 + 10.7 * C_3 + 11.4 * C_4 + 0 * T_1 + 2.51 * T_2 + 6.12 * T_3 + 7.91 * T_4 + 0 * L_1 + 2.44 * L_2 + 3.59 * L_3 + 5.24 * L_4$$

$$H = -4.06 - 17.7 * C_1 + 0 * C_2 + 9.31 * C_3 + 12.7 * C_4 - 8.1 * T_1 + 0 * T_2 + 7.07 * T_3 + 12 * T_4 - 6.01 * L_1 + 0 * L_2 + 3.91 * L_3 + 11 * L_4$$

$$VH = 17.9 - 33.7 * C_1 - 19.9 * C_2 + 0 * C_3 + 6.55 * C_4 - 25.5 * T_1 - 10 * T_2 + 0 * T_3 + 7.97 * T_4 - 20.8 * L_1 - 6.98 * L_2 + 0 * L_3 + 9.87 * L_4$$

Tout comme pour l'indice carrière, un indice est mis en place sur base des trois paramètres de la masse d'eau souterraine (C, T et L). À nouveau, les valeurs 0 et 1 sont attribuées aux quatre catégories de chacun des paramètres présents dans les équations : 0 si le site carrier étudié ne correspond pas à cette catégorie ou 1 si le site carrier étudié correspond à cette catégorie.

Les résultats des équations obtenus sont ensuite insérés dans les équations de probabilité (*Equation IV.21, Equation IV.22, Equation IV.23, Equation IV.24*). L'équation dont la probabilité est la plus élevée attribue son indice masse d'eau souterraine au site carrier étudié. L'indice peut soit être faible (low index), moyen (medium index), fort (high index) ou très fort (very high index).

- **Low index** : l'indice masse d'eau souterraine est faible ;
- **Medium index** : l'indice masse d'eau souterraine est moyenne ;
- **High index** : l'indice masse d'eau souterraine est forte ;
- **Very High index** : l'indice masse d'eau souterraine est très forte.

Après avoir calculé l'indice masse d'eau souterraine pour l'ensemble des combinaisons théoriques possibles, les tendances dans le tableau ci-dessous ont été observées (*Tableau IV.2*).

		Qualité de l'eau souterraine					
		Médiocre	Traitements mineurs	Bonne	Exceptionnelle		
Production des captages	> 30 m³/h					Zone IIa	Position relative du site et des captages
						Zone IIb	
						Alimentation	
						Hors zone	
	10 - 30 m³/h					Zone IIa	
						Zone IIb	
						Alimentation	
						Hors zone	
	2 - 10 m³/h					Zone IIa	
						Zone IIb	
						Alimentation	
						Hors zone	
	0 - 2 m³/h					Zone IIa	
						Zone IIb	
						Alimentation	
						Hors zone	

Tableau IV.2 : Probabilités de l'indice masse d'eau souterraine pour toutes les combinaisons des paramètres.

Dès lors, il est possible de déterminer directement, à l'aide des couleurs du tableau, les probabilités de l'indice masse d'eau souterraine pour une nouvelle carrière donnée. Par exemple, une carrière présentant la combinaison des paramètres C₃, T₂ et L₃ montre une probabilité de 15% de correspondre à un indice masse d'eau souterraine « medium », une probabilité de 65% à un indice masse d'eau souterraine « high » et de 20% à un indice masse d'eau souterraine « very high ».

IV.3.3 Calcul de l'indice d'interaction

L'indice d'interaction donne une première indication sur l'existence éventuelle d'une influence réciproque entre l'exploitation de la roche et la production d'eau potable. Il est obtenu en prenant compte d'une part les paramètres de la carrière en exploitation et d'autre part les paramètres de la masse d'eau souterraine.

Le modèle Logit fournit les probabilités que la carrière choisisse une des 4096 alternatives existantes possibles. On constate cependant que certains cas ne sont pas concevables dans la réalité. En effet, il paraît incohérent d'un point de vue hydrogéologique que le site carrier soit

ouvert par exemple au niveau d'une formation aquiclude et que des volumes supérieurs à 30 m³/h soient pompés dans les captages environnant le site. Dès lors, ces cas ont été éliminés de l'ensemble des cas théoriques possibles et il n'en reste plus que 3227.

Les équations obtenues pour l'interaction à l'aide du modèle de choix discrets Logit s'expriment de la manière suivante :

$$L = 0$$

$$M = -9.30 + 0 * H1 - 0.05 * H2 + 2.96 * H3 + 2.96 * H4 + 0 * P1 + 2.24 * P2 + 4.72 * P3 + 4.61 * P4 + 0 * G1 - 0.62 * G2 - 0.64 * G3 - 0.68 * G4 + 0 * C1 + 3.29 * C2 + 5.40 * C3 + 5.40 * C4 + 0 * T1 + 0.46 * T2 + 1.72 * T3 + 4.55 * T4 + 0 * L1 + 4.12 * L2 + 4.68 * L3 + 4.83 * L4$$

$$H = -2.09 + 0.82 * H1 - 0 * H2 + 5.15 * H3 + 5.15 * H4 - 5.36 * P1 + 0 * P2 + 3.93 * P3 + 3.82 * P4 + 0.5 * G1 + 0 * G2 - 0.02 * G3 - 0.03 * G4 - 6.94 * C1 + 0 * C2 + 5 * C3 + 5.36 * C4 - 3.57 * T1 + 0 * T2 + 2.98 * T3 + 6.5 * T4 - 7.23 * L1 + 0 * L2 + 1.92 * L3 + 3.24 * L4$$

$$VH = 24.6 - 7.45 * H1 - 9.13 * H2 + 0 * H3 + 0 * H4 - 17.2 * P1 - 7.89 * P2 + 0 * P3 - 0.11 * P4 - 0.49 * G1 + 0.02 * G2 + 0 * G3 + 0.04 * G4 - 23.9 * C1 - 8.62 * C2 + 0 * C3 + 0.788 * C4 - 13.2 * T1 - 6.28 * T2 + 0 * T3 + 2.52 * T4 - 14.1 * L1 - 3.73 * L2 + 0 * L3 + 3.36 * L4$$

À nouveau, des valeurs binaires sont attribuées aux quatre catégories de chacun des paramètres présents dans les équations : 0 si le site carrier étudié ne correspond pas à cette catégorie ou 1 si le site carrier étudié correspond à cette catégorie.

Les résultats des équations obtenus sont ensuite insérés dans les équations de probabilité (*Equation IV.21*, *Equation IV.22*, *Equation IV.23*, *Equation IV.24*). L'équation dont la probabilité est la plus élevée attribue son indice masse d'eau souterraine au site carrier étudié. L'indice peut soit être faible (« low »), moyen (« medium »), fort (« high ») ou très fort (« very high »).

IV.3.3.1 Validation mathématique

Afin de valider le modèle d'un point de vue mathématique, les mathématiciens ont calculé l'indicateur ρ^2 , qui correspond au R^2 de la régression linéaire. Cet outil permet de mesurer la qualité de reconstitution d'un modèle, c'est-à-dire la qualité de l'ajustement. Sa valeur est comprise entre 0 et 1 ; meilleur est le modèle plus ρ^2 est proche de 1. En pratique, une valeur de ρ^2 de 0,3-0,4 correspond à un ajustement de bonne qualité (Ségonne 1998)²⁰.

²⁰ <http://theses.univ-lyon2.fr/documents/getpart.php?id=lyon2.2000.smasson&part=32790>

La qualité du modèle mathématique utilisé pour définir les trois indices est donc considérée comme très élevée :

- l'indice carrière : $\rho^2 = 0,869$;
- l'indice masse d'eau souterraine : $\rho^2 = 0,877$;
- l'indice d'interaction : $\rho^2 = 0,623$.

IV.3.4 Application des indices carrière, masse d'eau souterraine et d'interaction

Les carrières de Triffoy et de Royseux, situées dans la région de Huy, ont été choisies pour illustrer les trois indices établis précédemment (*Figure IV.4*).

Déterminons quel est leur indice carrière :

- elles exploitent les formations de Montfort et d'Evieux à une cote piézométrique supérieure à celle de la nappe souterraine : « contexte $P > N$ » (P_1) ;
- ces formations sont regroupées dans la formation aquifère gréseuse du Famennien : « contexte aquifère » (H_3) ;
- elles sont bordées au nord par l'aquitard du Famennien et au sud par l'aquiclude de la Formation du Pont d'Arcole (étage Tournaisien) comporté de shales imperméables et les écoulements souterrains sont limités au nord-est par le Hoyoux : « contexte extension partiellement isolé » (G_2).

Les équations suivantes sont dès lors obtenues :

$$L = 0$$

$$M = -7.35 + 0 * 0 - 0.46 * 0 + 6.92 * 1 + 10.8 * 0 + 0 * 1 + 1.64 * 0 + 10.3 * 0 - 11.7 * 0 + 0 * 0 + 2.81 * 1 - 2.34 * 0 + 2.43 * 0 = 7.06$$

$$H = -6.21 - 9.44 * 0 + 0 * 0 + 11 * 1 + 15.6 * 0 - 10.5 * 1 + 0 * 0 - 12.7 * 0 + 14.2 * 0 - 4.76 * 0 + 0 * 1 + 1.65 * 0 + 2.12 * 0 = -5.71$$

$$VH = 22 - 25.6 * 0 - 22.5 * 0 + 0 * 1 + 6.43 * 0 - 25.9 * 1 - 16.4 * 0 + 0 * 0 + 1.67 * 0 - 0.49 * 0 + 0.02 * 1 + 0 * 0 + 0.04 * 0 = -3.92$$

Les résultats des équations obtenus sont ensuite insérés dans les équations de probabilité (*Equation IV.21*, *Equation IV.22*, *Equation IV.23*, *Equation IV.24*), ce qui donne :
 $P(L) + P(M) + P(H) + P(VH) = 0.08 + 0.92 + 0 + 0 = 1$

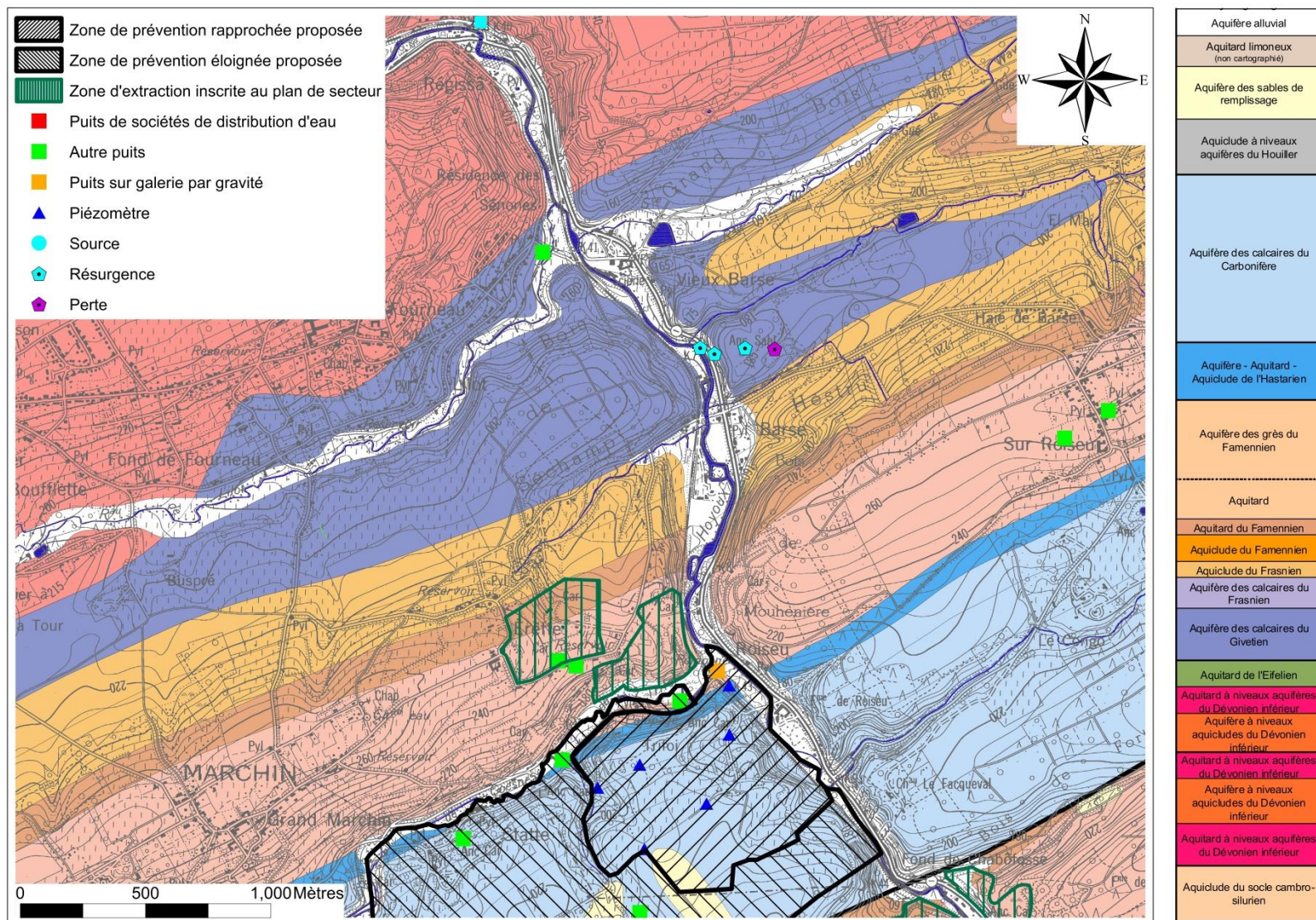


Figure IV.4 : Exemple des carrières de Triffoy et de Royseux en vert hachuré (carte hydrogéologique 48/3-4 Huy – Nandrin).

Concrètement, cela signifie que les carrières de Triffoy et de Royseux présentent une probabilité de 8% d'influencer faiblement les ressources en eaux souterraines et une probabilité de 92% de les influencer avec une importance moyenne (*Tableau IV.3*).

		Contexte géologique					
		Totalement isolé	Partiellement isolé	Extension locale	Extension régionale		
Contexte hydrogéologique	Aquifère carbonaté					$P = N < T (\neq NB)$	Contexte piézométrique
						$P = N < T (=NB)$	
						$P = N > T$	
						$P > N$	
	Aquifère					$P = N < T (\neq NB)$	
						$P = N < T (=NB)$	
						$P = N > T$	
						$P > N$	
	Aquitard					$P = N < T (\neq NB)$	
						$P = N < T (=NB)$	
						$P = N > T$	
						$P > N$	
	Aqiclude					$P = N < T (\neq NB)$	
						$P = N < T (=NB)$	
						$P = N > T$	
						$P > N$	

Tableau IV.3 : Indice carrière pour les carrières de Triffoy et de Royseux (x).

Déterminons ensuite quel est leur indice masse d'eau souterraine :

- elles se situent en dehors de la zone d'alimentation de la galerie de la CILE pompant dans les calcaires carbonifères : « contexte hors zone d'alimentation » (C_1) ;
- les captages implantés dans les grès, au sud-ouest du site, exploitent l'eau souterraine de l'aquifère avec un débit compris entre 2 et 10 m³/h : « production entre 2-10 m³/h » (T_2) ;
- la qualité des eaux pompées est bonne : « eau de bonne qualité » (L_3).

Les équations suivantes sont dès lors obtenues :

$$L = 0$$

$$M = -9.10 + 0 * 1 + 5.1 * 0 + 10.7 * 0 + 11.4 * 0 + 0 * 0 + 2.51 * 1 + 6.12 * 0 + 7.91 * 0 + 0 * 0 + 2.44 * 0 + 3.59 * 1 + 5.24 * 0 = -3$$

$$H = -4.06 - 17.7 * 1 + 0 * 0 + 9.31 * C_3 + 12.7 * 0 - 8.1 * 0 + 0 * 1 + 7.07 * 0 + 12 * 0 - 6.01 * 0 + 0 * 0 + 3.91 * 1 + 11 * 0 = -20.85$$

$$VH = 17.9 - 33.7 * 1 - 19.9 * 0 + 0 * 0 + 6.55 * 0 - 25.5 * 0 - 10 * 1 + 0 * 0 + 7.97 * 0 - 20.8 * 0 - 6.98 * 0 + 0 * 1 + 9.87 * 0 = -25.8$$

Les résultats des équations sont ensuite insérés dans les équations de probabilité, ce qui donne : $P(L) + P(M) + P(H) + P(VH) = 0.95 + 0.5 + 0 + 0 = 1$

Ce qui signifie concrètement que la masse d'eau souterraine présente une probabilité de 95% d'être influencée faiblement (voire nullement influencées) par les carrières de Triffoy et de Royseux et une probabilité de 5% d'être influencée par celles-ci avec une importance moyenne (*Tableau IV.4*).

		Qualité de l'eau souterraine					
		Médiocre	Traitements mineurs	Bonne	Exceptionnelle		
Production des captages	> 30 m³/h					Zone IIa	Position relative du site et des captages
						Zone IIb	
						Alimentation	
						Hors zone	
	10 - 30 m³/h					Zone IIa	
						Zone IIb	
						Alimentation	
						Hors zone	
	2 - 10 m³/h					Zone IIa	
						Zone IIb	
						Alimentation	
						Hors zone	
	0 - 2 m³/h					Zone IIa	
						Zone IIb	
						Alimentation	
						Hors zone	

Tableau IV.4 : Indice masse d'eau souterraine pour les carrières de Triffoy et de Royseux (x).

Et finalement, déterminons quel est leur indice d'interaction :

L = 0
$M = -9.30 + 0 * 0 - 0.05 * 0 + 2.96 * 1 + 2.96 * 0 + 0 * 1 + 2.24 * 0 + 4.72 * 0 + 4.61 * 0 + 0 * 0 - 0.62 * 1 - 0.64 * 0 - 0.68 * 0 + 0 * 1 + 3.29 * 0 + 5.40 * 0 + 5.40 * 0 + 0 * 0 + 0.46 * 1 + 1.72 * 0 + 4.55 * 0 + 0 * 0 + 4.12 * 0 + 4.68 * 1 + 4.83 * 0 = -1.86$
$H = -2.09 + 0.82 * 0 - 0 * 0 + 5.15 * 1 + 5.15 * 0 - 5.36 * 1 + 0 * 0 + 3.93 * 0 + 3.82 * 0 + 0.5 * 0 + 0 * 1 - 0.02 * 0 - 0.03 * 0 - 6.94 * 1 + 0 * 0 + 5 * 0 + 5.36 * 0 - 3.57 * 0 + 0 * 1 + 2.98 * 0 + 6.5 * 0 - 7.23 * 0 + 0 * 0 + 1.92 * 1 + 3.24 * 0 = -7.36$
$VH = 24.6 - 7.45 * 0 - 9.13 * 0 + 0 * 1 + 0 * 0 - 17.2 * 1 - 7.89 * 0 + 0 * 0 - 0.11 * 0 - 0.49 * 0 + 0.02 * 1 + 0 * 0 + 0.04 * 0 - 23.9 * 1 - 8.62 * 0 + 0 * 0 + 0.788 * 0 - 13.2 * 0 - 6.28 * 1 + 0 * 0 + 2.52 * 0 - 14.1 * 0 - 3.73 * 0 + 0 * 1 + 3.36 * 0 = -22.8$

Les résultats des équations sont ensuite insérés dans les équations de probabilité, ce qui donne : $P(L) + P(M) + P(H) + P(VH) = 0.86 + 0.14 + 0 + 0 = 1$

Ce qui signifie concrètement que l'interaction entre les carrières de Royseux et de Triffoy et la masse d'eau souterraine présente une probabilité de 86% d'être faible (voire nulle) et une probabilité de 14% d'être moyenne.

Pour illustrer l'indice d'interaction dans un tableau, il faut combiner l'indice carrière et l'indice masse d'eau souterraine. Il existe deux possibilités : soit l'indice carrière est fixé et l'interaction est reprise dans un tableau de l'indice masse d'eau souterraine, soit l'indice masse d'eau souterraine est fixé et l'interaction est reprise dans un tableau de l'indice carrière. Fixer l'indice carrière ou l'indice masse d'eau souterraine signifie fixer une combinaison de trois paramètres sur les six, dès lors, il existe 64 combinaisons différentes possibles.

➤ Exemple avec un indice carrière « medium » fixé (*Tableau IV.5*) :

- « contexte aquifère » (H_3) ;
- « contexte extension partiellement isolé » (G_2) ;
- « $P > N$ » (P_1).

L'indice d'interaction peut, selon les valeurs des paramètres relatifs à la masse d'eau souterraine, varier de « low » à « very high ». Dans le cadre des carrières Triffoy et Royseux, on obtient le tableau suivant :

		Qualité de l'eau souterraine					
		Médiocre	Traitements mineurs	Bonne	Exceptionnelle		
Production des captages	> 30 m ³ /h					Zone IIa	Position relative du site et des captages
						Zone IIb	
						Alimentation	
						Hors zone	
	10 - 30 m ³ /h					Zone IIa	
						Zone IIb	
						Alimentation	
						Hors zone	
	2 - 10 m ³ /h					Zone IIa	
						Zone IIb	
						Alimentation	
						Hors zone	
	0 - 2 m ³ /h					Zone IIa	
						Zone IIb	
						Alimentation	
						Hors zone	

Tableau IV.5 : Probabilités d'indice d'interaction pour les carrières de Triffoy et Royseux (x).

➤ Exemple avec un indice masse d'eau souterraine « medium » fixé (*Tableau IV.6*) :

- « contexte hors zone d'alimentation » (C_1) ;
- « production entre 2-10 m³/h » (T_2) ;
- « eau de bonne qualité » (L_3).

L'indice d'interaction peut, selon les valeurs des paramètres relatifs à la masse d'eau souterraine, varier de « low » à « medium ». Dans le cadre des carrières Triffoy et Royseux, on obtient le tableau suivant :

		Contexte géologique					
		Totalement isolé	Partiellement isolé	Extension locale	Extension régionale		
Contexte hydrogéologique	Aquifère carbonaté					P = N < T (≠NB)	Contexte piézométrique
						P = N < T (=NB)	
						P = N > T	
						P > N	
	Aquifère					P = N < T (≠NB)	
						P = N < T (=NB)	
						P = N > T	
						P > N	
	Aquitard					P = N < T (≠NB)	
						P = N < T (=NB)	
						P = N > T	
						P > N	
	Aquiclude					P = N < T (≠NB)	
						P = N < T (=NB)	
						P = N > T	
						P > N	

Tableau IV.6 : Probabilités d'indice d'interaction pour les carrières de Triffoy et Royseux (x).

IV.3.5 Évolution temporelle de l'indice d'une carrière

La méthode définie dans cette étude s'applique à une carrière lorsque celle-ci est en phase d'exploitation. Cependant, elle peut tout à fait s'appliquer à une carrière avant que son exploitation n'ait été entamée (exemples de carrières dans la région de Tournai : Obesco (Holcim), Barry (CCB), Hemptinne (Carmeuse)) et également après que celle-ci ait pris fin (exemple de la carrière CCB à Gaurain-Ramecroix).

Certains paramètres tels que le contexte piézométrique, le potentiel qualitatif de l'eau souterraine et la production des captages peuvent varier au cours de l'exploitation d'une carrière ; par exemple suite à l'approfondissement du site carrier ou à l'implantation d'un nouveau captage à proximité. L'indice d'interaction changera en conséquence, constituant ainsi un point fort de la méthode.

IV.4 CONCLUSION

Un indice d'interaction entre l'activité extractive et l'exploitation des eaux souterraines a été réalisé sur base d'une équation paramétrique inspirée de celle utilisée pour l'évaluation des risques naturels. Chaque paramètre comporte quatre catégories dont la combinaison caractérise le site carrier étudié et détermine si l'indice d'interaction sera faible, moyen, fort ou très fort.

Deux méthodes ont été utilisées pour combiner et pondérer les six paramètres : le modèle de choix discrets et un réseau de neurones artificiels. Les vecteurs d'entrée pour obtenir l'indice d'interaction sont identiques dans les deux méthodes. Cependant, à la sortie, la première méthode fournit des probabilités pour chacun des quatre degrés d'interaction alors que la deuxième méthode fournit une réponse unique, c'est-à-dire un seul degré d'interaction. Dans 82,54% des cas, l'indice d'interaction obtenu à l'aide du modèle de choix discrets dont la probabilité est la plus élevée concorde avec l'indice d'interaction obtenu à l'aide du réseau de neurones artificiels. Notons que l'information obtenue à l'aide de la méthode probabiliste

est plus grande mais il a été démontré que la qualité du modèle obtenu à l'aide de la méthode déterministe, et donc la fiabilité des résultats, est plus élevée.

Un des points forts de la méthodologie ainsi établie est qu'elle permet de réactualiser très facilement l'indice d'interaction en cas de modification d'un paramètre au cours du temps, suite par exemple à la contamination de la nappe d'eau souterraine, à l'approfondissement du site carrier, à l'implantation d'un nouveau captage à proximité du site, à l'abandon d'une prise d'eau, etc.

Cet indice d'interaction présente l'avantage de contextualiser aisément un site d'étude en synthétisant clairement les informations existantes. Il est toutefois très important de réaliser que cet indice ne fournit qu'un outil d'évaluation relative. Il n'a pas été établi pour donner des réponses absolues, ni pour estimer la faisabilité de l'extension ou de l'approfondissement d'un site carrier. C'est pourquoi la méthode des choix discrets a été préférée à celle du réseau de neurones artificiels.

V APPROCHE QUANTITATIVE PAR MODÉLISATION

Il s'agit dans ce chapitre de démontrer scientifiquement le bien-fondé des paramètres choisis pour établir l'indice d'interaction, ainsi que les catégories dans lesquelles ils sont subdivisés. Dans cette optique, une approche quantitative des paramètres (contexte hydrogéologique, contexte géologique, contexte piézométrique et position relative d'un site carrier et de captages pour la distribution publique d'eau potable) a été entreprise par modélisation mathématique. Des scénarios d'exploitation d'un site carrier ont été simulés à l'aide du logiciel Visual Modflow. Les fluctuations de la piézométrie, des débits exhaurés et des débits de rivière ont été étudiées en faisant varier une série de paramètres hydrogéologiques, telle que la conductivité hydraulique.

V.1 INTRODUCTION À LA MODÉLISATION

Un système hydrogéologique est tellement complexe qu'il ne sera jamais possible d'en étudier tous les aspects en détails. Dès lors, un **modèle conceptuel** est défini ; il correspond à une synthèse du comportement réel du système, basée sur l'analyse de données qualitatives et quantitatives disponibles à un moment donné. Il est tenu de constituer une simplification de la réalité, pour laquelle il est important de connaître les éléments pouvant être ignorés sans risque et ceux qu'il est essentiel d'inclure.

Dans le cadre de notre thèse, la modélisation mathématique du comportement d'une nappe souterraine a été réalisée à l'aide du logiciel **Visual Modflow Flex** (Waterloo Hydrogeologic Inc 2014). Ce logiciel sert à apporter des solutions numériques aux problèmes d'écoulement des eaux souterraines à travers les aquifères et les mécanismes de transport en milieu poreux saturé, à l'aide d'un code aux différences finies. Il permet de modéliser les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines, l'évolution de la chimie des eaux le long de la ligne d'écoulement et les transferts de polluants.

Dans le cas d'un aquifère non-confiné, l'épaisseur saturée peut fluctuer avec le temps. Sous de telles conditions, la transmissivité de l'aquifère change, telle qu'elle constitue le produit de la conductivité hydraulique, K , et de l'épaisseur saturée, h . L'équation de diffusion est une équation différentielle partielle qui décrit la dynamique de densité au sein d'un matériau subissant une diffusion (Domenico et Schwartz 1990 ; Selker et al. 1999 ; Fetter 2001 ; Mays 2005). Elle peut être déterminée en appliquant l'équation de conservation de la masse sur un volume de contrôle en insérant la loi de Darcy et en supposant que la densité est constante et que les gains et les pertes du volume du fluide soient proportionnels aux changements de la piézométrie (Domenico et Schwartz 1990).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (\text{Equation V.4})$$

- $K_{x,y,z}$ = composante de la conductivité hydraulique dans les directions x,y,z (m/s) ;
- h = hauteur piézométrique dans le système (m) ;
- S_s = emmagasinement spécifique (1/m) ;

- t = temps (s) ;
- R = terme général de source/perte qui définit le volume de l'afflux vers le système par unité de volume de l'aquifère par unité de temps. Il permet les transferts de flux entrant et sortant en fonction des conditions frontières (*Rushton et Tomlinson 1979*).

Le logiciel Visual Modflow Flex permet de réaliser des simulations d'écoulement souterrain en régime permanent et en régime transitoire dans un milieu anisotrope et hétérogène en trois dimensions. Peuvent également être simulés des échanges de flux, des puits, le lit des rivières, l'écoulement au niveau d'un pompage, la recharge de la nappe souterraine, l'évapotranspiration. Des hétérogénéités spatiales, telles que des axes d'écoulement préférentiels, peuvent être discrétisées.

La modélisation mathématique est un processus continu et cyclique. Il s'agit au départ d'émettre des hypothèses puis de tester le modèle. Suivant les résultats obtenus, le modèle est réévalué en boucle en ajustant les valeurs des paramètres jusqu'à fournir le modèle le plus approprié pour le problème étudié. Le degré de développement du modèle est déterminé par la disponibilité des données et la sophistication des outils utilisés pour tester le modèle.

V.2 IDENTIFICATION DU CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Les modèles hydrogéologiques sont des modèles physiquement basés et spatialement distribués qui nécessitent de définir une série de facteurs essentiels (*Rushton 1999*). Il s'agit de paramètres tels que :

- la géologie et le contexte structural (plis, failles,...) au niveau de la carrière et de la zone environnante ;
- l'hydrogéologie de la zone, incluant les niveaux piézométriques de la nappe et la configuration d'écoulement (horizontalement et verticalement) ;
- les paramètres d'écoulement (coefficient d'emménagement, conductivité hydraulique,...) et de transport (porosité efficace, dispersivité,...) ;
- le réseau hydrographique comprenant les lacs, les rivières, les sources, etc., et leur altitude par rapport au niveau de la nappe ;
- les termes du bilan hydrogéologique tels que les précipitations, l'infiltration et le ruissellement ;
- la configuration physique de la fosse excavée, c'est-à-dire l'extension latérale, les paliers et la profondeur ;
- l'emplacement du puits ou de la fosse d'exhaure, les quantités pompées et les fluctuations saisonnières.

Dans le cadre de notre thèse, la modélisation va nous aider à déterminer l'importance de l'influence de ces paramètres sur les **débits exhaérés** dans le site carrier et sur l'**étendue du cône de rabattement** de la nappe d'eau souterraine.

V.3 CONSTRUCTION DU MODÈLE CONCEPTUEL

La construction du modèle mathématique se déroule en plusieurs étapes :

- conceptualisation ;
- discrétisation de la zone étudiée ;
- définition des conditions aux limites ;
- définition des paramètres du contexte hydrogéologique ;
- simulations.

V.3.1 Conceptualisation du modèle

Le modèle suivant a été imaginé :

- une superficie de 25 km² culmine à la cote altimétrique de 280 m, à l'ouest. Dans la vallée, à l'est, un cours d'eau (ligne bleue) s'écoule du nord vers le sud (*Figure V.1*) ;
- un site carrier (carré rouge), dont le plancher présente une superficie de 16 ha, est ouvert à flanc de coteau à une altitude initiale comprise entre 230 et 200 m. Son extension latérale sera simulée vers l'est, en direction du cours d'eau. Son approfondissement sera simulé par paliers successifs de 15 m et nécessitera, une fois la nappe d'eau souterraine atteinte, de mettre en place de l'exhaure ;
- trois captages pour la distribution publique d'eau potable (ronds blancs) situés à l'ouest, à l'est et au nord du site carrier.

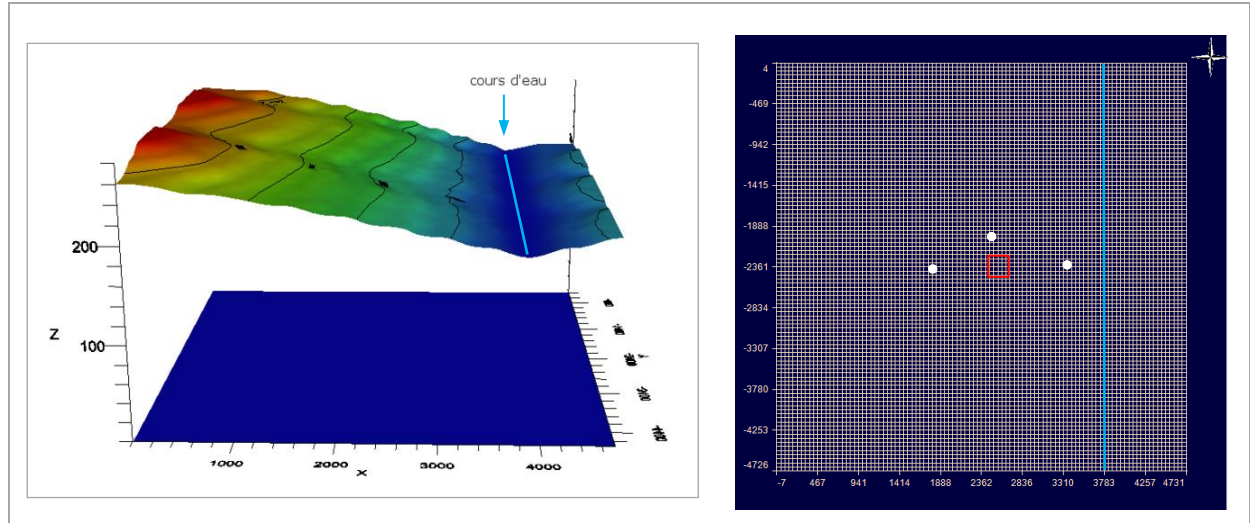


Figure V.1 : Topographie en trois dimensions du domaine modélisé (figure de gauche) et emplacement du cours d'eau, de la carrière et des captages (figure de droite) (Visual Modflow).

Cette situation théorique peut être illustrée par l'exemple de la fosse d'exhaure de la carrière de Merlemont, située dans la région de Philippeville (*Figure V.2*).

Remarquons qu'en cas d'exhaure le niveau de la nappe est imposé par le carrier ; le contexte hydrogéologique déterminera les volumes exhaurés.



Figure V.2 : Photo de la fosse de Beumont dans la carrière de Merlemont (sud-ouest de Philippeville).

V.3.2 Discrétisation du modèle

Pratiquement, une surface de 5 km de côté a été créée. La limite inférieure du domaine a été fixée à une cote altimétrique de 0 m et la limite supérieure correspond à une cote topographique s'échelonnant de 190 à 280 m. Le domaine a été discrétisé en un réseau de cellules prismatiques juxtaposées de 50 m de côté et d'une épaisseur maximale de 280 m (Figure V.3).

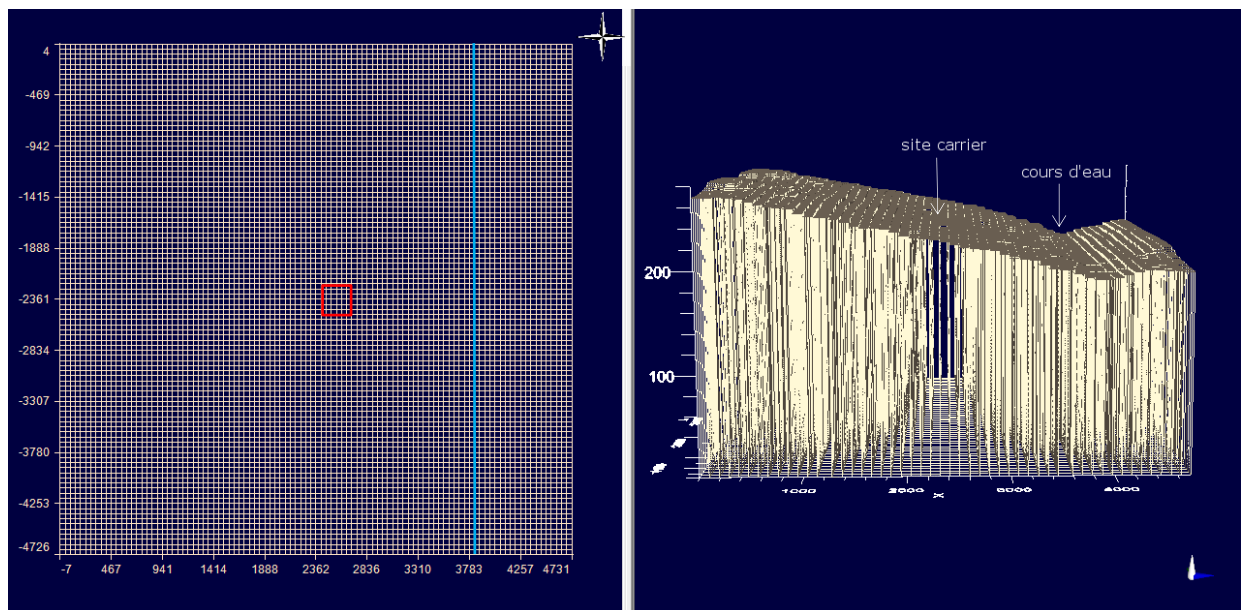


Figure V.3 : Maillage du domaine modélisé en deux et trois dimensions (Visual Modflow).

La taille des cellules du maillage a été fixée à 50 m de manière à limiter le nombre de cellules tout en gardant un certain degré de précision. Suivant la spécificité du milieu, les cellules de la maille peuvent être raffinées à 10 ou 25 m ou au contraire fusionnées à 100 m.

Pour un système d'écoulement souterrain aux conditions géologiques et hydrogéologiques complexes, le nombre de couches du modèle peut avoir un impact potentiel sur les résultats de simulation du modèle (*Gao 2011*). Toutefois, comme il s'agit dans le cas présent d'un modèle théorique simple, une monocouche sera établie et les paramètres définis seront dès lors constants en fonction de la profondeur.

V.3.3 Paramètres hydrogéologiques

Des paramètres hydrogéologiques sont attribués à l'ensemble des cellules du domaine.

V.3.3.1 Conductivité hydraulique

L'écoulement des systèmes d'eau souterraine est mathématiquement décrit par la différence de la cote piézométrique entre deux points et par un facteur de retardement, c'est-à-dire la conductivité hydraulique, selon la loi de Darcy (*Darcy 1856*) (*Equation V.1*).

$$Q = -K A \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (\text{Equation V.1})$$

- **Q** : débit volumique filtrant (m³/s) ;
- **K** : conductivité hydraulique ou coefficient de perméabilité du milieu poreux (m/s) ;
- **A** : surface de la section étudiée (m²) ;
- $\frac{\Delta h}{\Delta l}$: gradient hydraulique où Δh est la différence des hauteurs piézométriques en amont et en aval de l'échantillon et l est la longueur de l'échantillon.

La loi de Darcy est valide pour les milieux poreux naturels où les accélérations locales dans le fluide sont bien moindre que les forces visqueuses, qui sont souvent observées à des nombres de Reynolds (forces d'inertie sur forces visqueuses) plus grands que 10 (*Selker et al. 1999 ; Mays 2005*).

Sur base des gammes de valeurs observées dans les cartes hydrogéologiques de Wallonie et obtenues dans l'étude *Synclin'Eau* (*Brouyère et al. 2010*), nous avons défini des **valeurs de conductivité hydraulique moyenne** de la roche pour les quatre types de formations hydrogéologiques (*Tableau V.1*).

Unité hydrogéologique	Symbole	Conductivité hydraulique
Aquiclude	K ₁	5.10 ⁻⁷ m/s
Aquitard	K ₂	5.10 ⁻⁶ m/s
Aquifère	K ₃	5.10 ⁻⁵ m/s
Aquifère carbonaté	K ₄	5.10 ⁻⁴ m/s

Tableau V.1 : Valeurs de conductivité hydraulique pour chacune des formations hydrogéologiques définies.

V.3.3.2 Coefficient d'emménagement

Les simulations seront réalisées en régime permanent, c'est-à-dire en ne prenant pas compte des variations saisonnières des paramètres du bilan hydrogéologique. Dès lors, le coefficient d'emménagement ne joue pas de rôle dans les résultats.

V.3.3.3 Piézométrie initiale

Pour commencer la simulation d'écoulement, il est utile d'introduire des valeurs initiales de piézométrie dans le modèle (*Figure V.4*). Elles sont déterminées en tenant compte des valeurs de recharge décrites dans le sous-chapitre V.3.5. Cette piézométrie permet au modèle de calculer les valeurs piézométriques de référence qui seront utilisées pour calculer les valeurs de rabattement de la nappe, tel que mesuré par la différence entre la piézométrie de départ et la piézométrie calculée. La piézométrie est bien sûr calculée en fonction du niveau de base régional, donné par la cote altimétrique du thalweg du cours d'eau, et en fonction des conditions aux frontières décrites dans le sous-chapitre V.3.4.

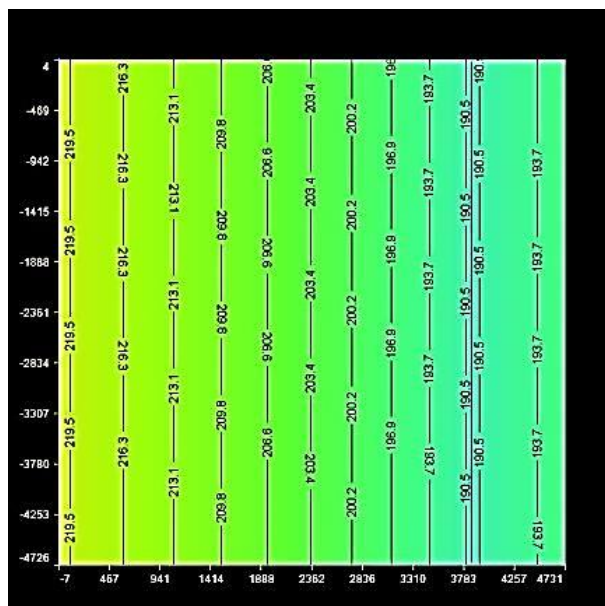


Figure V.4 : Piézométrie initiale de la nappe souterraine pour une roche d'une K de 5.10^{-5} m/s et une recharge de 200 mm. Un potentiel a été imposé à la rivière (+190 m), à l'ouest (+220 m) et à l'est (+195 m).

V.3.4 Conditions imposées au sein du domaine

Certaines conditions vont être attribuées à l'ensemble des cellules du domaine (la recharge), d'autres à un groupe précis de cellules : la condition rivière, le potentiel imposé (au plancher de la carrière) et la condition mur (simulation d'une formation aquiclude).

V.3.4.1 Recharge

La recharge correspond au flux d'eau qui vient alimenter le réservoir souterrain à partir de la surface (*de Vries et Simmers 2002*). Autrement dit, elle correspond à la composante de l'eau utile rechargeant effectivement la nappe souterraine au cours d'une année hydrogéologique. L'approvisionnement se fait principalement par les précipitations, mais

aussi par le réseau hydrographique lorsque celui-ci est infiltrant. La recharge peut ne pas être homogène sur l'ensemble d'une zone modélisée car elle dépend de différents facteurs tels que les caractéristiques du sol, la topographie, la géomorphologie et le régime de précipitations.

Théoriquement, il s'agit de percolation, qui correspond à l'écoulement vertical de l'eau dans le sol en direction de la nappe souterraine, sous la seule influence de la gravité. Ce processus suit l'infiltration en surface et conditionne directement l'alimentation en eau des nappes en profondeur (*Equation V.2*).

$$I = P - ETR - R \text{ (Equation V.2)}$$

- **I** : recharge de la nappe (mm) ;
- **P** : précipitations (mm) ;
- **ETR** : évapotranspiration réelle (mm) ;
- **R** : ruissellement (mm).

L'évapotranspiration, qui intervient dans l'équation, peut fortement varier au niveau de la carrière dépourvue de toute couverture végétale, en comparaison à la zone recouverte d'un sol et de végétation. Dès lors, la notion de **précipitations efficaces** est introduite.

Les méthodes d'estimation de la recharge sont nombreuses et ont été synthétisées par *Scanlon et al. (2002)*. Elles comprennent entre autres le bilan hydrique, les données hydrologiques de surface (écoulement de base, bilans en eau entre des stations limnimétriques, mesures d'infiltration, etc.), l'étude de la zone saturée basée sur les fluctuations piézométriques ou sur la loi de Darcy.

Concrètement, notre modèle a d'abord tourné avec une recharge équivalente à 200 mm pour les différents types d'unités hydrogéologiques (aquifère carbonaté, aquifère, aquitard et aquiclude). Cependant, un dôme piézométrique supérieur à la topographie apparaissait pour les formations dont la conductivité hydraulique était inférieure à 5.10^{-5} m/s (K_3 et K_4), traduisant une recharge trop élevée. Dès lors, il a été question de définir des recharges préférentielles théoriques pour chacune des unités hydrogéologiques.

Dans ce but, les **coefficients d'infiltration** définis pour les formations hydrogéologiques étudiées dans le cadre de l'étude *Synclin'Eau (Brouyère et al. 2010)* ont été utilisés. La recharge de la nappe souterraine a pu être déduite à partir des précipitations, de l'évapotranspiration réelle au niveau du bassin versant et des coefficients d'infiltration (*Equation V.3*).

$$I = CI.(P - ETR) \text{ (Equation V.3)}$$

- **CI** : coefficient d'infiltration ;
- **I** : recharge de la nappe (mm) ;
- **P** : précipitations (mm) ;
- **ETR** : évapotranspiration réelle (mm).

Les valeurs des paramètres qui ont été choisies pour les précipitations et l'évapotranspiration dans notre étude sont les suivantes (*Brouyère et al. 2010*) :

- $P = 850$ mm, ce qui correspond à la valeur moyenne sur l'ensemble de la masse d'eau RWM021 (les calcaires carbonifères du bassin de Dinant) entre 1970 et 2008 ;

- $ETR = 510$ mm ;

ce qui donne $P - ETR = 340$ mm.

Les valeurs de recharge ont été calculées sur base des coefficients d'infiltration définis par *Brouyère et al. (2010)*. Néanmoins, certaines des valeurs calculées ont dû être adaptées afin d'être compatibles avec les valeurs de conductivité hydraulique que nous avons attribuées aux unités hydrogéologiques (*Tableau V.2*).

Unité hydrogéologique	Conductivité hydraulique	Formation hydrogéologique de Wallonie	CI	I dans l'étude <i>Synclin'Eau</i>	I dans notre modèle
Aquiclude	5.10^{-7} m/s	Aquicludes à niveaux aquifères du Houiller et du Famennien-Frasnien	0,1	34 mm	5 mm
Aquitard	5.10^{-6} m/s	Aquitards à niveaux aquicludes du socle Cambro-Silurien et du Dévonien inférieur	0,3	102 mm	35 mm
Aquifère	5.10^{-5} m/s	Aquifère des grès du Famennien	0,6	204 mm	200 mm
Aquifère carbonaté	5.10^{-4} m/s	Aquifère des calcaires carbonifères	0,8	272 mm	270 mm

Tableau V.2 : Valeurs de recharge définies pour chacune des unités hydrogéologiques de notre étude.

On observe que les valeurs de recharge attribuées dans notre modèle aux formations aquifère et aquifère carbonaté sont égales à celles calculées dans l'étude *Synclin'Eau*, alors que pour les formations aquitard et aquiclude, les valeurs choisies pour la modélisation ont fortement été revues à la baisse.

Remarquons que les coefficients d'infiltration ne peuvent être considérés que pour une estimation globale, sur de longues périodes de temps (plusieurs décennies) et pour des domaines étendus (de l'ordre du bassin versant), en admettant que les variations spatiales et temporelles des paramètres qui régissent l'infiltration réelle soient complètement lissées.

V.3.4.2 Condition rivière

L'interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface prend place à de multiples échelles à la fois dans le temps et dans l'espace (*Toth 1970 ; Schaller et Fan 2009*). Elle est principalement contrôlée par les conditions de la topographie et de la géologie du terrain (*Woessner 2000*). On peut affirmer, plus précisément, qu'elle est régie par les fluctuations du niveau piézométrique de la nappe d'eau entre les deux systèmes et les propriétés des

matériaux le long de l'interface d'interaction (Rushton et Tomlinson 1979 ; Nemeth et Solo-Gabriele 2003).

Les eaux de surface telles que les rivières, les ruisseaux, les lacs et les marécages peuvent soit contribuer à alimenter le système d'eau souterrain, soit agir comme des zones de déversement des eaux souterraines, suivant le gradient hydraulique entre le corps d'eau de surface et le système d'eau souterrain. Il existe ainsi trois possibilités (Winter et al. 1998) (Figure V.5).

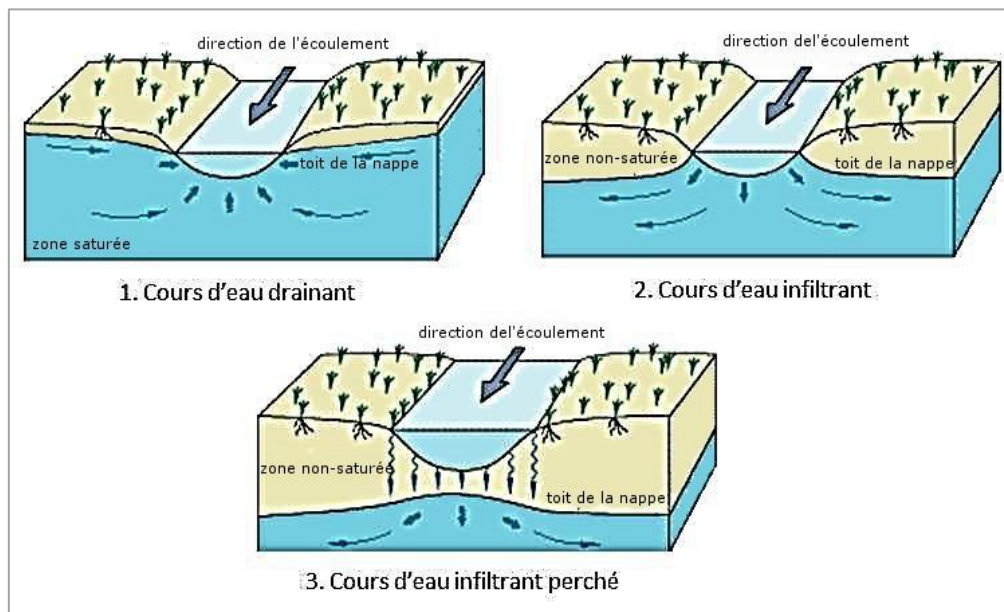


Figure V.5 : Illustration des conditions générales pour des cours d'eau drainant et infiltrant (Winter et al. 1998, modifié).

- soit le cours d'eau est drainant, c'est-à-dire que l'eau souterraine s'écoule en direction du cours d'eau,
- soit le cours d'eau est infiltrant, c'est-à-dire que l'eau du cours d'eau s'écoule en direction de la nappe, mais peut cependant rester connecté (zone totalement saturée jusqu'à la nappe),
- soit le cours d'eau est infiltrant et de plus est déconnecté (zone non saturée entre le cours d'eau et la nappe).

La **condition rivière** est ainsi utilisée pour simuler l'interaction entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Concrètement, le modèle simule cette interaction via une couche d'infiltration (au niveau du lit de la rivière) séparant le corps d'eau de surface du système d'eau souterrain (Figure V.6). Pour ce faire, les informations suivantes sont requises pour chaque cellule de la grille contenant une condition rivière : la cote altimétrique du sommet de la rivière (190 m), la cote altimétrique du fond du lit de la rivière (176 m) et la conductance.

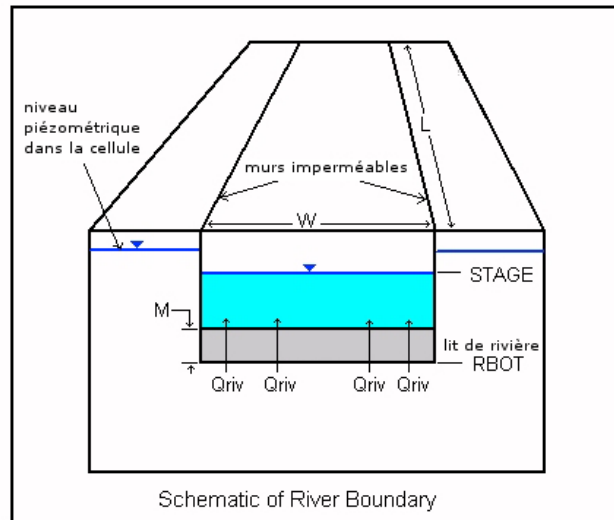


Figure V.6 : Paramètres à introduire pour définir une condition rivière (Visual ModflowFlex 2014, modifié).

Pour rappel, la conductance (m^2/s) est une mesure de l'efficacité à transporter des fluides à travers un milieu. La magnitude de la conductance affecte le taux de recharge de l'eau souterraine ou l'interaction avec celle-ci.

Elle peut être calculée de la manière suivante :

$$C = \frac{K \cdot L \cdot W}{M} \quad (\text{Equation IV.3})$$

- **K** : conductivité hydraulique des sédiments du lit de la rivière (m/s) ;
- **L** : longueur d'un tronçon à travers une cellule (m) ;
- **W** : largeur de la rivière dans la cellule (m) ;
- **M** : épaisseur du lit de la rivière (m).

La largeur de la rivière a été fixée à 25 m, l'épaisseur du lit à 4 m et la hauteur d'eau à 10 m. Seule la conductivité hydraulique verticale des sédiments du lit de la rivière varie suivant les différents scénarios d'exploitation de la carrière et de l'exhaure (de 10^{-9} m/s, correspondant à une argile, à 10^{-3} m/s, correspondant à un sable graveleux).

En effet, la valeur de la conductivité hydraulique du lit de la rivière peut influencer la direction des écoulements de la nappe (Rosenberry et Pitlick 2009). Lorsque le thalweg est constitué de sable ou d'un mélange de sable graveleux, l'infiltration du cours d'eau induira des flux descendants, ce qui n'est pas le cas lorsque le thalweg est constitué d'argile par exemple.

L'équation de diffusion constitue une des équations gouvernant l'interaction aquifère-rivière (Domenico et Schwartz 1990 ; Selker et al. 1999 ; Fetter 2001 ; Todd et Mays 2005). La condition rivière constitue un type de condition frontière où R prend la forme de la loi de Darcy, qui est communément utilisée pour définir la quantité d'eau qui circule entre une rivière et un aquifère (Rushton et Tomlinson 1979).

V.3.4.3 Condition mur

Une **condition mur** (ou barrière) est utilisée pour simuler de minces formations géologiques (lignes marron), verticales et de faible conductivité hydraulique, qui entravent l'écoulement horizontal de l'eau souterraine (*Figure V.7*). Elle peut ainsi empêcher une quantité d'eau qui percole dans des formations perméables de venir alimenter un cours d'eau présent en aval. Par conséquent, si de l'exhaure est réalisée dans un site carrier en amont de la barrière hydrogéologique, les répercussions sur le débit du réseau hydrographique en aval seront amoindries, voire nuls.

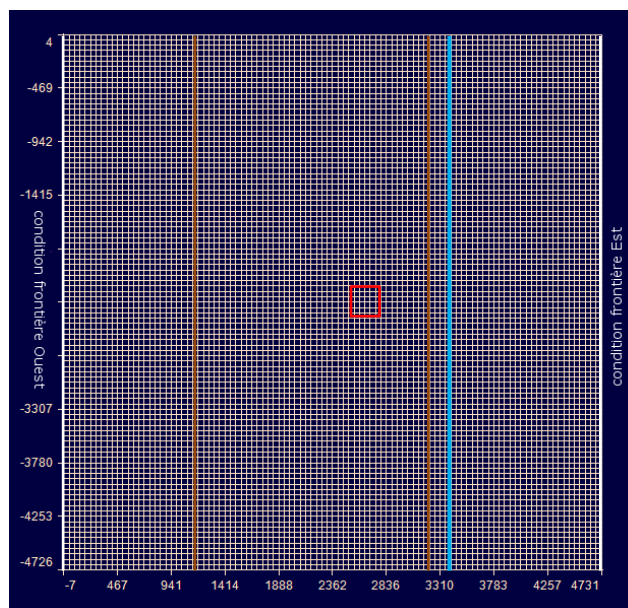


Figure V.7 : Condition « mur » dans un domaine modélisé en trois dimensions (Visual Modflow).

Les paramètres nécessaires à introduire pour cette condition frontière sont l'épaisseur de la barrière (100 m), sa conductivité hydraulique (10^{-9} m/s) et il est nécessaire de désigner la face des cellules de la maille contre laquelle la barrière sera localisée.

V.3.5 Conditions aux frontières du domaine

Chaque modèle requiert au niveau de ses limites une série de conditions appropriée pour représenter la relation du système étudié avec les systèmes environnants. Dans le cas d'un modèle d'écoulement des eaux souterraines, les conditions frontières décrivent l'échange de flux entre le modèle et le système extérieur. Dans le cas d'un modèle de transport d'une masse d'eau, les conditions frontières décrivent l'échange entre le modèle et le système extérieur.

Ces conditions sont déterminées par l'identification des structures hydrogéologiques et par le niveau piézométrique et ses fluctuations. En effet, les limites du domaine d'étude coïncident avec des limites physiques au niveau desquelles la description des flux peut être effectuée de manière conceptuelle.

V.3.5.1 Potentiel imposé

On a recours à un **potentiel imposé** (condition frontière de Dirichlet) pour fixer le niveau piézométrique dans une cellule de la maille sans qu'elle ne subisse réellement l'influence des cellules avoisinantes. Une telle cellule va donc agir comme une perte d'eau infinie quittant le système ou comme une source infinie d'eau entrant dans le système.

Dans le présent modèle, une telle condition a été imposée aux frontières ouest et est du modèle. Sur base des cartes piézométriques obtenues en situation initiale pour les valeurs de recharge définies les cotes piézométriques suivantes ont été fixées à l'ouest :

- pour une roche d'une conductivité hydraulique K_1 (5.10^{-7} m/s) : 245 m ;
- pour une roche d'une conductivité hydraulique K_2 (5.10^{-6} m/s) : 235 m ;
- pour une roche d'une conductivité hydraulique K_3 (5.10^{-5} m/s) : 220 m ;
- pour une roche d'une conductivité hydraulique K_4 (5.10^{-4} m/s) : 210 m.

La piézométrie de la nappe à l'est de la rivière a été fixée à 195 m à la frontière est (*Figure V.8*).

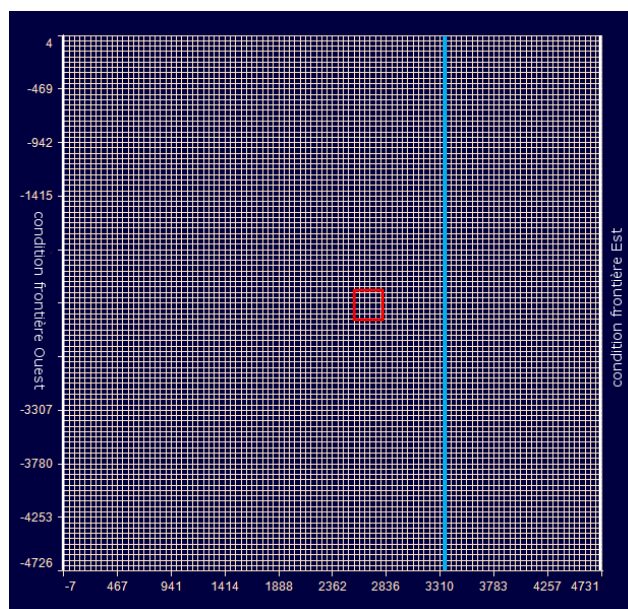


Figure V.8 : Conditions frontières à l'ouest et l'est du domaine modélisé (Visual Modflow).

Aux frontières nord et sud, aucun potentiel n'est imposé. Les flux d'eau souterraine transversaux sont donc nuls, ce qui revient à simuler des frontières imperméables (condition frontière de Neumann).

Précisons qu'au minimum une cellule active de la grille du modèle doit contenir un type de condition frontière dépendante de la piézométrie, c'est-à-dire soit un potentiel imposé tel qu'un lac, une rivière ou un ruisseau, qui agit comme une cote altimétrique de référence pour tous les calculs. Travaillant en régime permanent, toutes les conditions frontières assignées à ce modèle demeureront constantes.

V.4 SIMULATIONS

Afin d'évaluer l'impact de l'exhaure d'une carrière sur le comportement des eaux souterraines et l'influence sur les captages pour la distribution publique, diverses simulations en régime permanent ont été réalisées. Plusieurs scénarios hydrogéologiques ont été simulés. Ainsi, notre choix des paramètres de l'indice carrière (le contexte hydrogéologique, le contexte géologique et le contexte piézométrique) et des paramètres de l'indice masse d'eau souterraine (la position relative des captages et du site carrier et la production des captages), définis dans le chapitre précédent pour établir l'indice d'interaction, pourra être argumenté.

V.4.1 Simulations avec variation de la conductivité hydraulique

Une série de simulations a été réalisée en faisant varier la conductivité hydraulique de la roche exploitée dans une carrière dont le fond de fosse, d'une superficie de 16 ha, s'approfondi de la cote +200 m à la cote +170 m. Les quatre valeurs de conductivité hydraulique définies précédemment pour chacune des formations hydrogéologiques : aquiclude ($K_1 : 5.10^{-7}$ m/s), aquitard ($K_2 : 5.10^{-6}$ m/s), aquifère ($K_3 : 5.10^{-5}$ m/s) et aquifère carbonaté ($K_4 : 5.10^{-4}$ m/s) ont successivement été attribuées à l'entièreté de la zone modélisée. Ensuite, l'impact engendré sur les eaux souterraines, ainsi que sur le débit d'exhaure, a été observé.

En situation naturelle, c'est-à-dire avant que l'ouverture de la carrière ne modifie son environnement, la nappe souterraine est de manière générale superficielle dans les roches peu perméables (à quelques mètres sous la surface) et profonde dans les roches fort perméables (plusieurs dizaines mètres sous la surface) (*Figure V.9*).

Après simulation de l'approfondissement du site carrier, on observe les isopièzes de la nappe pour les différents scénarios. On constate que le cône de rabattement de la nappe provoqué par la mise en place d'exhaure s'étend en direction de la rivière et est d'autant plus important dans les scénarios avec des roches présentant des conductivités hydrauliques élevées (K_3 (5.10^{-5} m/s) et K_4 (5.10^{-4} m/s)) que dans les scénarios avec des roches présentant des conductivités hydrauliques faibles (K_1 (5.10^{-7} m/s) et K_2 (5.10^{-6} m/s)).

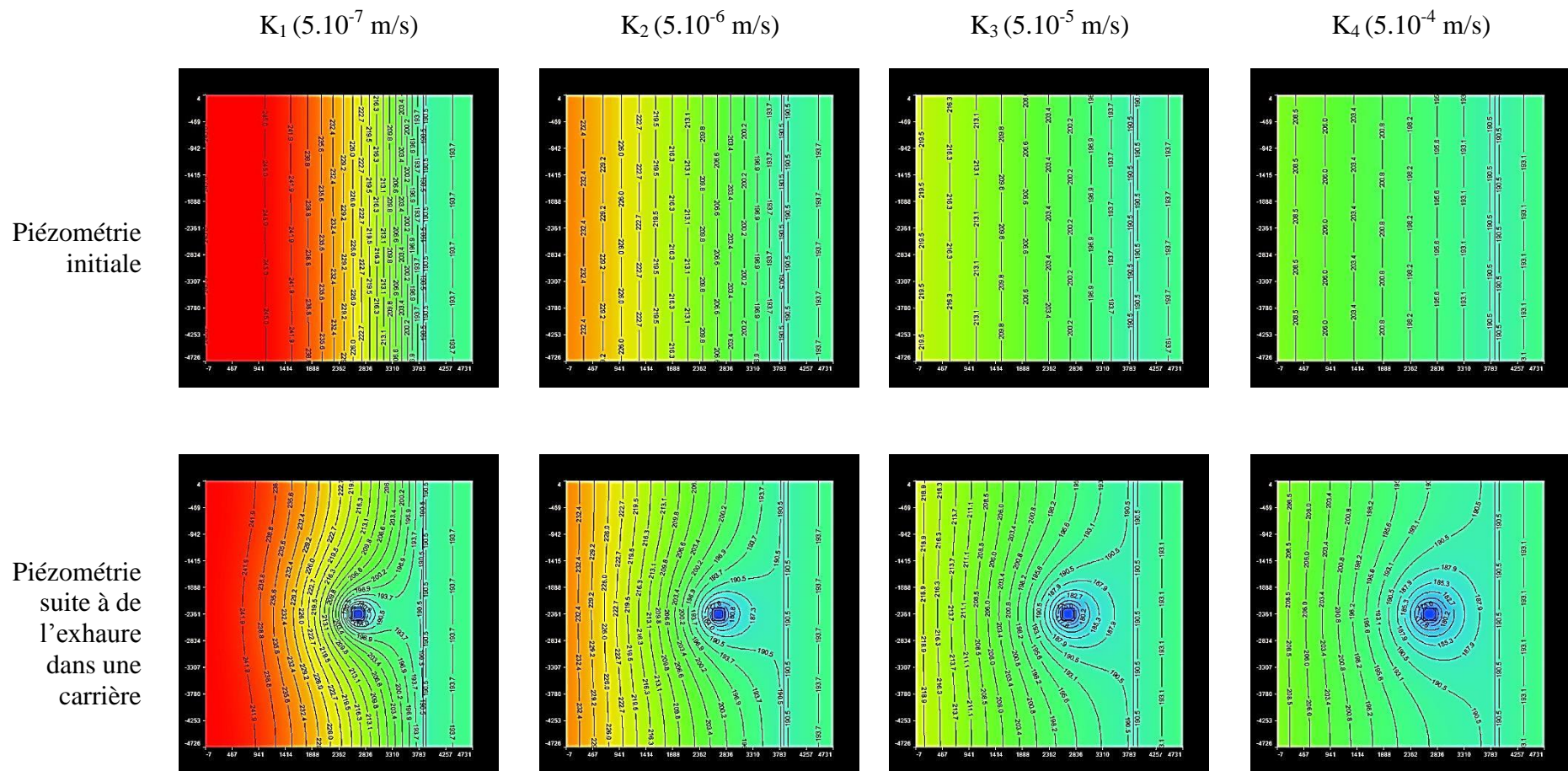


Figure V.9 : Cartes piézométriques suivant les quatre valeurs de conductivité hydraulique de roche définies. PI à la rivière (+190 m) et au plancher de la carrière (+170 m) d'une superficie de 16 ha.

Le schéma ci-dessous illustre la comparaison entre un cône de rabattement engendré par de l'exhaure réalisée dans une roche de faible conductivité hydraulique (low K) et dans une roche de forte conductivité hydraulique (high K) (Figure V.10).

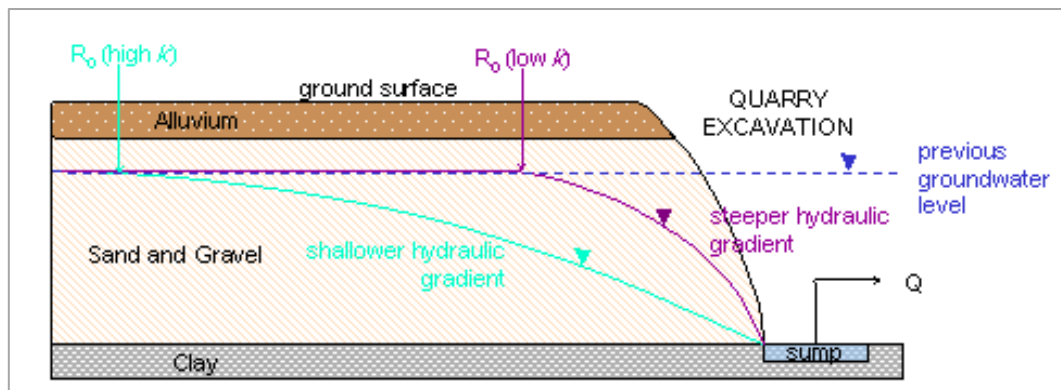


Figure V.10 : La variation de la conductivité hydraulique influence l'étendue de la zone d'influence de l'exhaure (Goodwin et al. 2007).

En ce qui concerne les débits exhaurés dans la carrière, on observe qu'ils augmentent en fonction de la conductivité hydraulique de la roche et que l'augmentation au cours de l'approfondissement est d'autant plus importante que la conductivité hydraulique de la roche est élevée (Figure V.11).

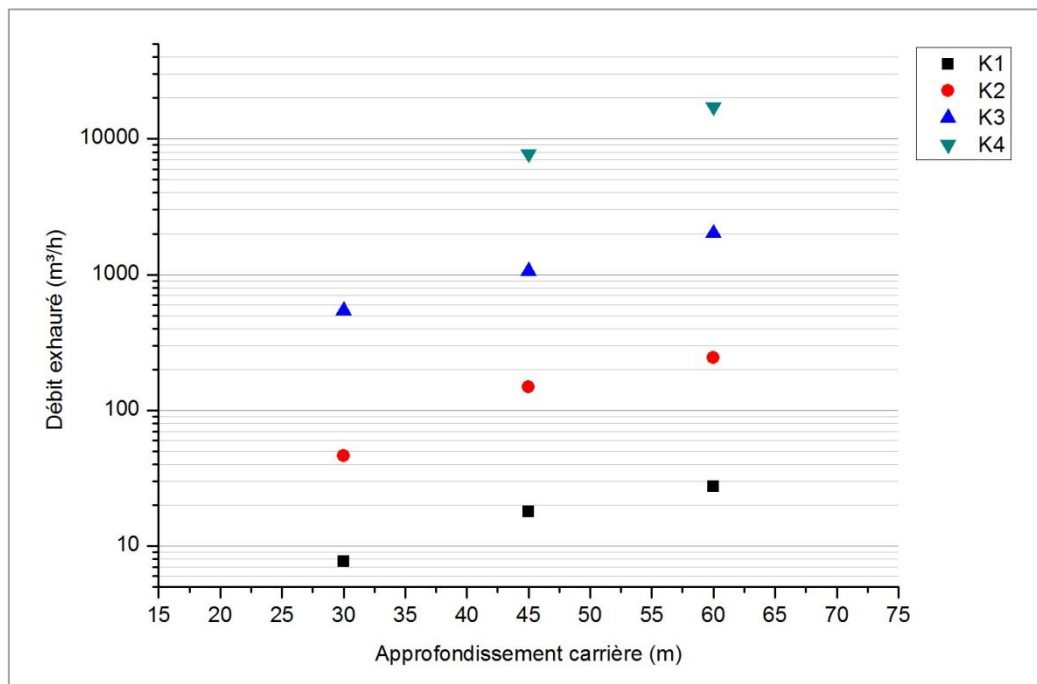


Figure V.11 : Evolution des débits exhaurés en fonction de la conductivité hydraulique de la roche exploitée et de l'approfondissement du site carrier.

On note que les volumes pompés dans un aquiclude ($K_1 : 5.10^{-7}$ m/s) sont 400 à 600 fois inférieurs aux volumes pompés dans un aquifère carbonaté ($K_4 : 5.10^{-4}$ m/s). Il a d'ailleurs été nécessaire d'avoir recours à une échelle logarithmique pour pouvoir illustrer tous les résultats dans le même diagramme. Quant aux volumes pompés dans un aquiclude, ils sont jusqu'à 10

fois inférieurs aux volumes pompés dans un aquitard ($K_2 : 5.10^{-6}$ m/s), qui sont eux 5 à 10 fois inférieurs aux volumes pompés dans un aquifère ($K_3 : 5.10^{-5}$ m/s), eux-mêmes jusqu'à 20 fois inférieurs aux volumes pompés dans un aquifère carbonaté.

L'absence de débit exhauré au premier palier d'exploitation de la carrière, lorsque la roche possède une conductivité hydraulique K_4 (5.10^{-4} m/s), s'explique par le fait qu'il n'y ait pas de rabattement de la nappe. En effet, cette dernière se situant à 4 m (+196 m) sous le fond de fosse (+200 m), aucune exhaure n'est réalisée.

On en conclut que la conductivité hydraulique de la roche exploitée joue un rôle majeur dans la variation de la quantité des volumes pompés et de l'étendue du cône de rabattement de la nappe souterraine en situation d'exhaure. Ainsi est défini le « **contexte hydrogéologique** » (**paramètre H**) de l'indice d'interaction. Les catégories **H₁**, **H₂**, **H₃** et **H₄** représentant les conductivités hydrauliques des différentes unités hydrogéologiques peuvent être décrétées pertinentes.

V.4.2 Simulations avec approfondissement d'une carrière

L'approfondissement progressif d'un site carrier, d'une superficie de 16 ha, a été simulé à partir de la cote topographique initiale (+230 m). On constate que l'influence sera plus ou moins grande suivant que la **cote altimétrique du plancher** (P) est supérieure ou inférieure à la **cote piézométrique de la nappe souterraine** (N) et supérieure ou inférieure au **niveau de base régional** (NB), qui dans ce modèle correspond à la rivière (T) qui s'écoule à l'est, à la cote +190 m. Un potentiel imposé est donc fixé au niveau de la rivière.

Initialement, pour une roche d'une formation aquifère carbonaté (**H₄**), la cote piézométrique de la nappe souterraine est de +196 m sous la future carrière. Le premier palier d'exploitation (cote +200 m) s'étend donc au-dessus du niveau piézométrique de la nappe (catégorie **P₁** de l'indice d'interaction) tandis que le deuxième palier (catégorie **P₃**) et le troisième palier (catégorie **P₃**) sont entamés sous la cote altimétrique du thalweg de la rivière.

On observe, dès l'approfondissement du premier palier, la mise en place d'un cône de rabattement de la nappe, qui s'étendra vers l'aval jusqu'à atteindre la rivière. Cependant, celle-ci demeure drainante car un potentiel y a été imposé (*Figure V.12*).

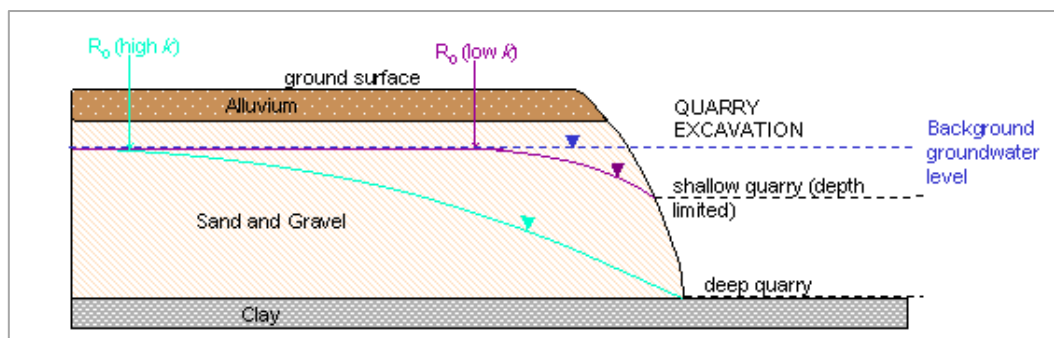


Figure V.13 : La variation de la profondeur de la carrière influence l'étendue de la zone d'influence de l'exhaure (Goodwin et al. 2007).

Dans un même contexte hydrogéologique, les débits exhaurés dans la carrière augmentent d'un palier au suivant (Figure V.11) ; l'augmentation s'avère être d'autant plus importante au passage du premier au deuxième palier (facteur de 11 pour K_4 , 3 pour K_3 , 1,9 pour K_2 et 1,1 pour K_1) qu'à celui du deuxième au troisième palier (facteur de 1,9 pour K_4 , 1,6 pour K_3 , 1,4 pour K_2 et 1,1 pour K_1). Cette forte croissance s'explique par la variation du gradient hydraulique qui s'ensuit.

On en conclut que la position relative de la cote altimétrique du plancher de la carrière par rapport à la cote piézométrique de la nappe souterraine et à la cote du cours d'eau constituant le niveau de base régional est un facteur clé dans la variation des débits exhaurés dans la carrière et du gradient hydraulique de la nappe. Ce paramètre sera repris dans la notion de « **contexte piézométrique** » (**paramètre P**) de l'indice d'interaction.

V.4.3 Simulations avec variation de la nature du lit de la rivière

Par ailleurs, un autre paramètre qui va jouer un rôle important dans la piézométrie est la conductivité hydraulique du lit de la rivière constituant le niveau de base régional. Celle-ci va en effet déterminer le drainage ou l'éventuelle infiltration du cours d'eau, encouragée par l'exhaure dans la carrière ouverte à l'ouest. Pour tester ce paramètre, il existe deux possibilités de condition frontière à attribuer au cours d'eau : un **potentiel imposé** ou une **condition rivière**.

Pour fixer un potentiel imposé, il suffit d'attribuer une cote piézométrique aux cellules de la maille au niveau du lit de la rivière (+190 m). Par contre, l'établissement d'une condition rivière nécessite l'introduction de plusieurs valeurs : les cotes altimétriques de la surface (+190 m) et du fond du cours d'eau (+176 m), sa largeur (25 m), l'épaisseur de son lit (4 m), et la conductivité hydraulique verticale (K_v) de celui-ci.

Les valeurs qui ont successivement été utilisées dans la modélisation pour la conductivité hydraulique verticale du lit de la rivière proviennent des gammes de valeurs suggérées pour les « Soil Behaviour Type » par Robertson et al. (1986) et modifiées par Lunne et al. (1997) (Tableau V.3).

Type d'alluvions	Conductivité hydraulique
Sable dense à sable graveleux	10^{-3} m/s
Sable	10^{-5} m/s
Mélange de sable ou mélange de silt	10^{-7} m/s
Argile ou sol organique	10^{-9} m/s

Tableau V.3 : Conductivités hydrauliques des différents types d'alluvions rencontrés.

Dès lors, des simulations ont été réalisées en attribuant à la rivière une des trois conditions frontières suivantes :

- un potentiel imposé ;
- une condition rivière de haute K_v (10^{-3} m/s) ;
- une condition rivière de faible K_v (10^{-7} m/s).

En absence d'un potentiel imposé au niveau du thalweg de la rivière (cote +190 m), les valeurs de piézométrie attribuées aux frontières ouest et est ont été modifiées par rapport aux scénarios simulés précédemment. En effet, en conservant les cotes de +220 m et +195 m, pour une conductivité hydraulique de roche K_3 (5.10^{-5} m/s), la piézométrie obtenue était, au niveau du thalweg, supérieure à la topographie. Pour rester cohérent, des valeurs de +203,5 m et +185,5 m ont dès lors été fixées respectivement à la frontière ouest et à la frontière est du domaine.

Lors de la simulation de l'extension d'une carrière, de 16 ha à 96 ha, au troisième palier (+170 m) en direction de la rivière, on constate que le cône de rabattement engendré par la mise en place d'exhaure se limite à la rive ouest de la rivière lorsqu'un potentiel est imposé à celle-ci. Elle demeure donc, en rive est, drainante sur la totalité de son cours (*Figure V.14*). Par contre, lorsqu'une condition rivière est fixée, le cône de rabattement s'étend à la rive est et au-delà la rivière. La cote piézométrique de la nappe est inférieure de 6 m (extension de la carrière : 16 ha) à 14 m (extension de la carrière : 80 ha) par rapport au lit de la rivière, rendant alors celle-ci partiellement infiltrante dans la zone du cône de rabattement généré par l'exhaure.

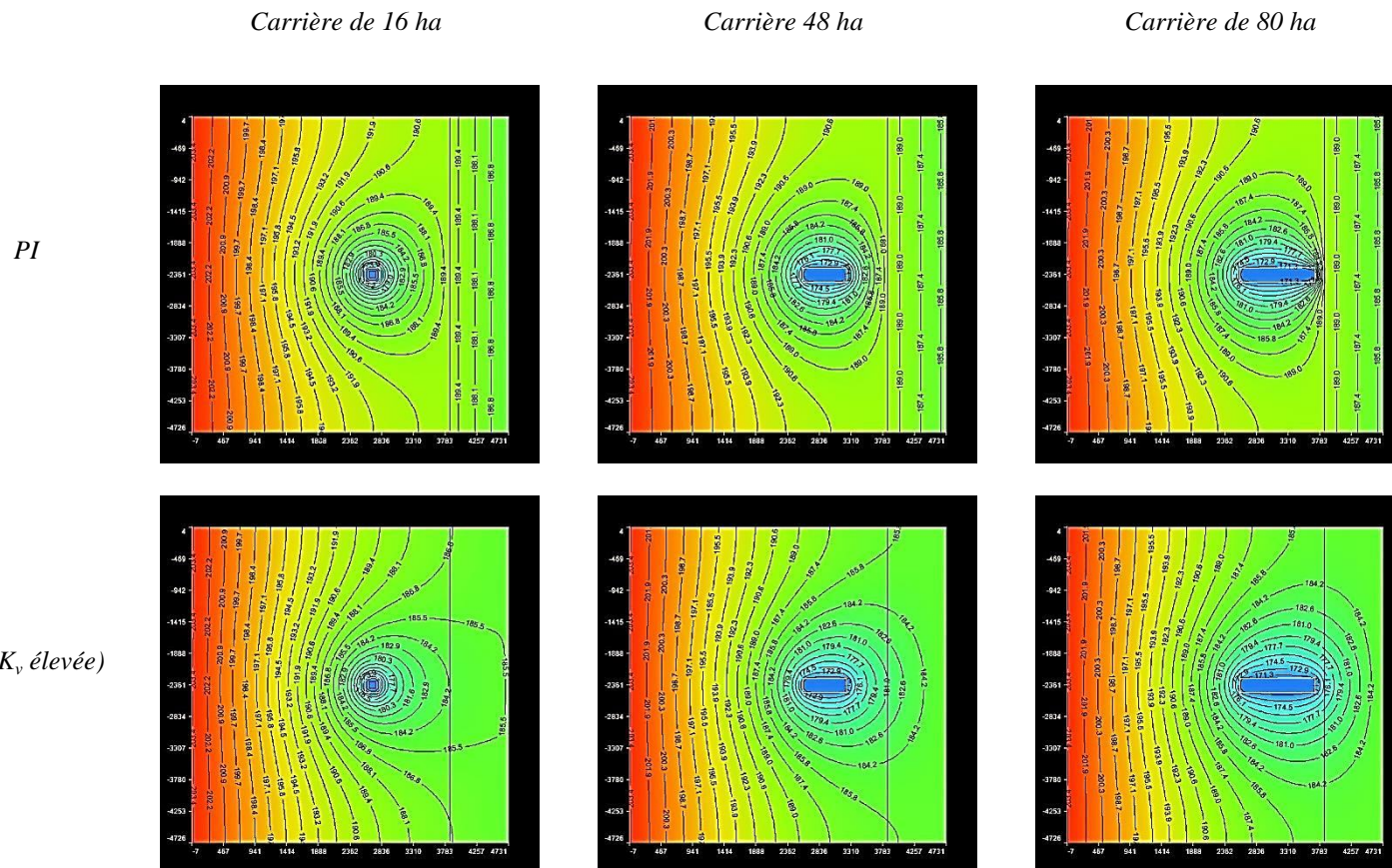


Figure V.14 : Comparaison de la piézométrie de la nappe souterraine dans une formation aquifère en fonction de l'extension d'une carrière (cote du plancher à +170 m) dans un scénario avec un potentiel imposé à la rivière (PI à +190 m) et un scénario avec une condition rivière (CR).

Quant aux volumes exhaurés dans la carrière, ils sont plus importants (de 13%) lorsqu'un potentiel est imposé à la rivière que lorsqu'une condition rivière y est fixée (*Figure V.15*). La différence se marque d'autant plus avec l'extension de la carrière (d'un facteur de 1,15 pour l'extension minimale de la carrière à un facteur de 1,9 pour l'extension maximale). Remarquons que pour les conditions rivières avec des K_v faible ou élevée, les volumes pompés dans la carrière ne diffèrent que de 0,06%.

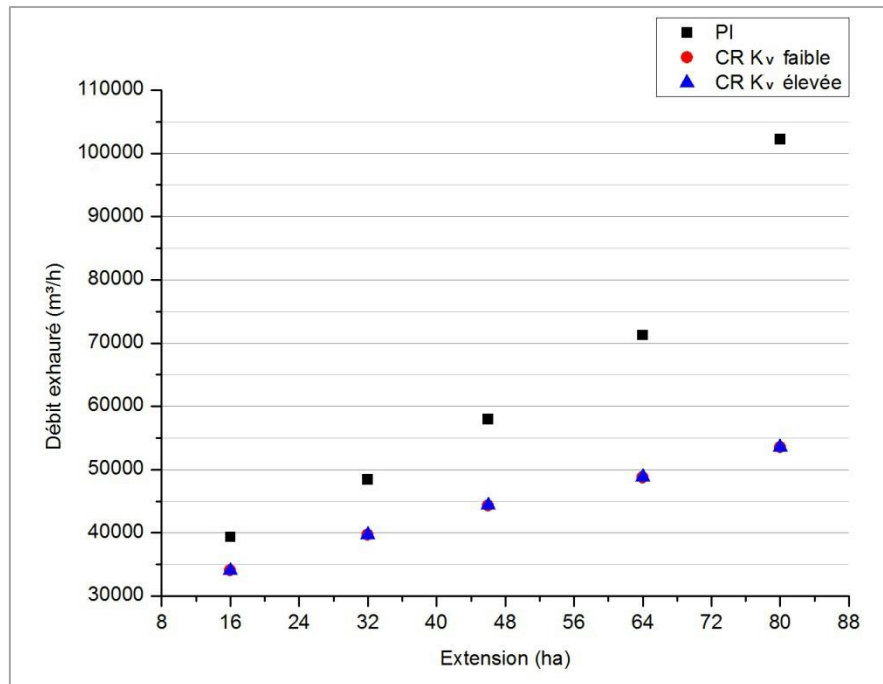


Figure V.15 : Valeurs du débit exhauré dans la carrière en fonction de son extension en direction de la rivière pour trois différentes conditions imposées à la rivière.

Compte tenu de la densité du réseau hydrographique en Wallonie et de l'influence que peut jouer l'exhaure en carrière sur l'alimentation d'un cours d'eau en fonction de la nature de son lit, cette notion sera reprise dans le « **contexte piézométrique** » (**paramètre P**) de l'indice d'interaction. Il permet en effet de faire la distinction entre les catégories P_3 ($P = N < T$ ($=NB$)), c'est-à-dire la situation d'exploitation pour laquelle la cote altimétrique du plancher de la carrière est inférieure à la cote piézométrique naturelle de la nappe et à la cote altimétrique du thalweg d'une rivière qui constitue le niveau de base régional et P_4 ($P = N < T$ ($\neq NB$)), c'est-à-dire la situation d'exploitation pour laquelle la cote altimétrique du plancher de la carrière est inférieure à la cote piézométrique naturelle de la nappe et à la cote altimétrique du thalweg de la rivière, mais qui ne constitue plus le niveau de base régional.

V.4.4 Simulations avec extension d'une carrière

Une extension progressive du plancher de la carrière (16 ha, 32 ha, 48 ha, 64 ha et 80 ha) vers l'est, en direction de la rivière, a été simulée (*Figure V.16*). Le fond de fosse de la carrière, d'abord distant d'1 km de la rivière, se rapproche jusqu'à se trouver à 15 m de celle-ci. Dans ces simulations, la rivière impose le potentiel au niveau de son thalweg. On observe que le cône de rabattement de la nappe prend de l'ampleur au fur et à mesure que l'exploitation s'étend vers l'est. Dès qu'il atteint la rivière, celle-ci s'infiltre.

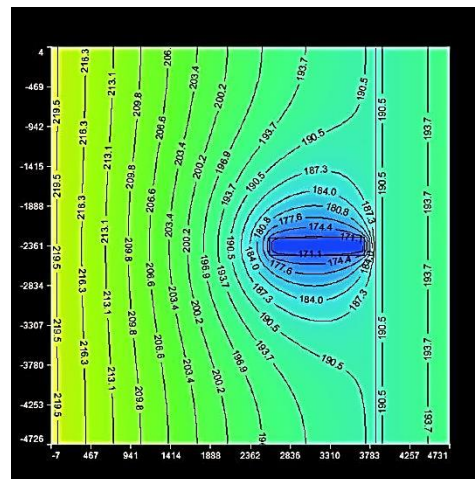
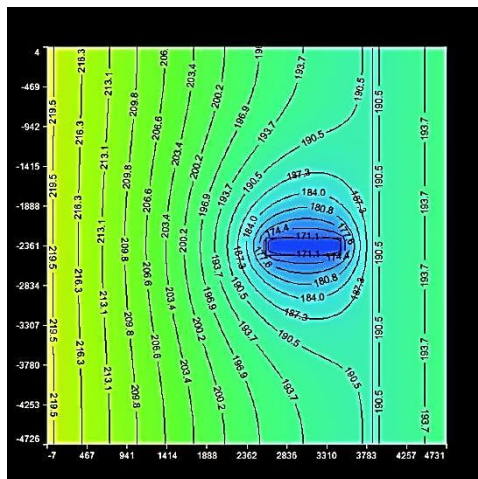
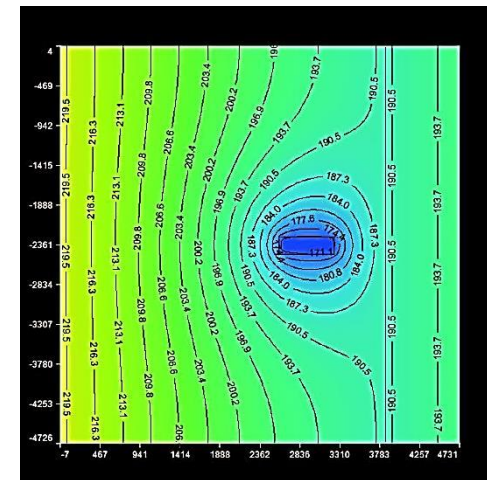
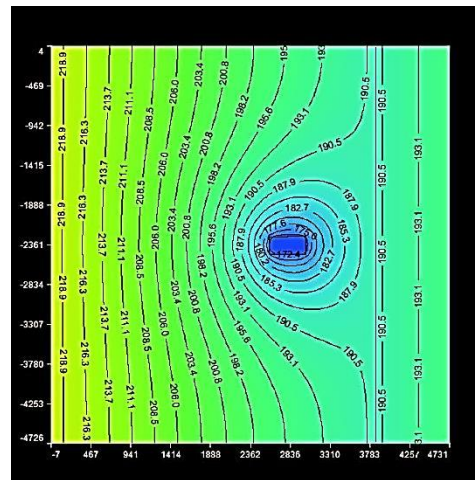
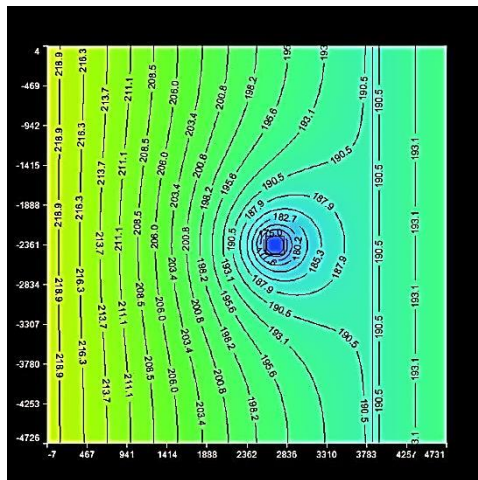


Figure V.16 : Cartes piézométriques en fonction de l'extension de la carrière. $K : 5.10^{-5}$ m/s, $R : 200$ mm, PI à la rivière (+190 m) et au plancher de la carrière (+170 m).

Néanmoins, si l'on compare l'évolution de l'infiltration de la rivière suite à l'extension du site carrier et suite à son approfondissement, on remarque qu'elle est relativement faible (*Figure V.17*).

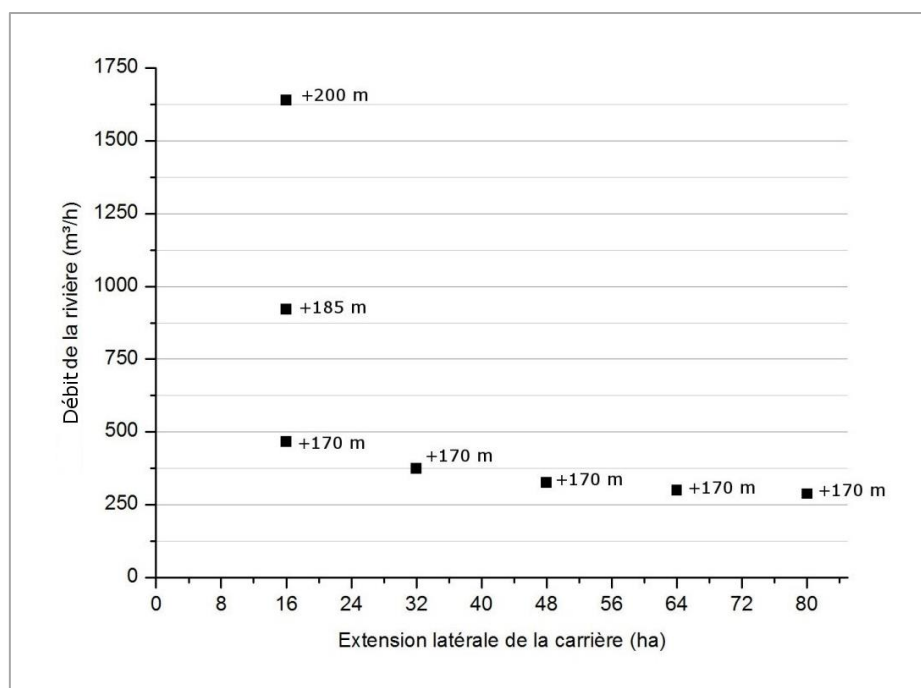


Figure V.17 : Evolution du débit de la rivière en fonction de l'approfondissement et de l'extension d'une carrière. PI à la rivière (+190 m) et conductivité hydraulique de la roche K_3 (5.10^{-5} m/s).

Quant aux débits exhaurés dans la carrière, ils n'augmentent pas de manière significative en fonction de l'extension du site (*Figure V.18*). En effet, on dénote une augmentation d'un facteur compris entre 1,14 et 1,02 lorsque le plancher du site s'étend d'une superficie à la suivante et cela pour toutes conductivités hydrauliques confondues, à une profondeur d'exploitation de +170 m.

Si l'on compare d'une part l'évolution des débits pompés suivant l'approfondissement du site carrier et en fonction de la conductivité hydraulique de la roche et d'autre part l'évolution des débits pompés suivant l'extension du site, on constate que cette dernière est plus faible. En effet, les débits augmentent d'un facteur de 2,3 lors de l'extension du site (K de la roche : 5.10^{-5} m/s), de 3,7 lors de l'approfondissement du site (K de la roche : 5.10^{-5} m/s) et d'un facteur de 70,6 (premier palier) à 627 (troisième palier) d'une conductivité hydraulique K_1 (K : 5.10^{-7} m/s) à une conductivité hydraulique K_4 (K : 5.10^{-4} m/s).

Les mêmes constatations ont été faites au niveau de l'influence de l'extension de la carrière sur l'infiltration de la rivière. Par conséquent, le paramètre « **extension** » sera considéré comme un paramètre secondaire et ne sera pas pris en compte dans le calcul de l'indice d'interaction.

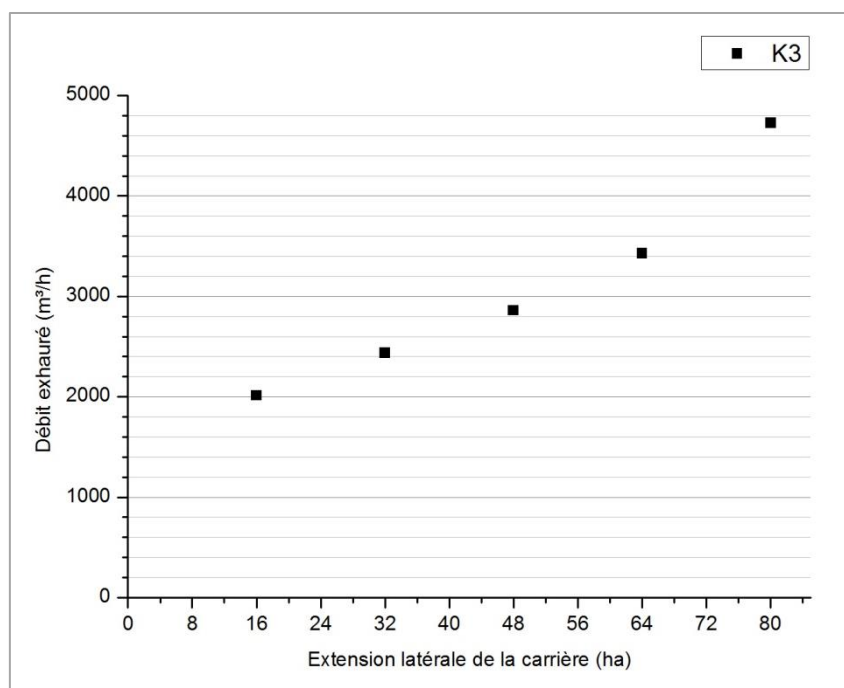


Figure V.18 : Evolution du débit exhauré en fonction de l'extension de la carrière vers la rivière. PI à la rivière (+190 m) et au plancher de la carrière (+170 m).

V.4.5 Simulations avec présence de barrières hydrogéologiques

La présence de formations géologiques peu perméables dans des aquifères carbonatés est fréquemment observée en Région wallonne. Citons notamment la Formation de Nismes (Frasnien inférieur) et la Formation du Pont d'Arcole (Tournaisien inférieur). Cette situation est schématisée ci-dessous (Figure V.19).

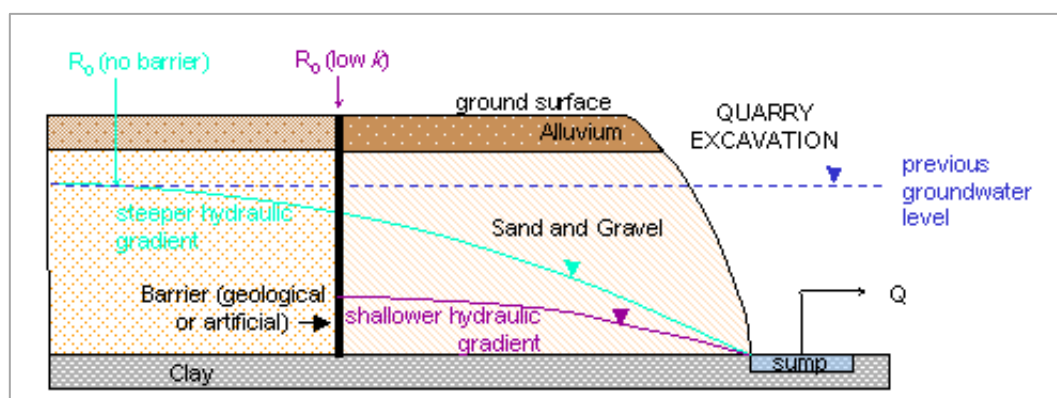
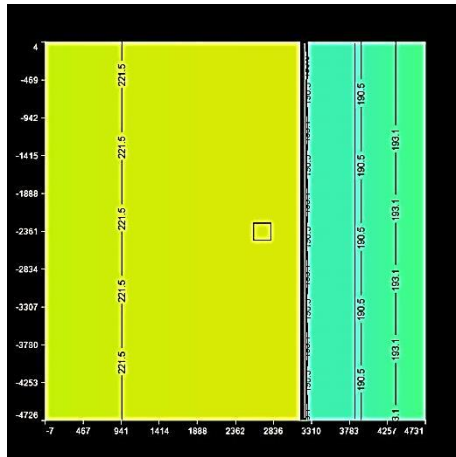
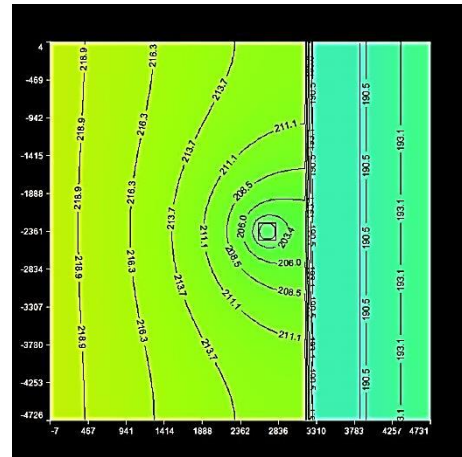


Figure V.19 : Le rôle des barrières géologiques sur l'étendue de la zone d'influence de l'exhaure (Goodwin et al. 2007).

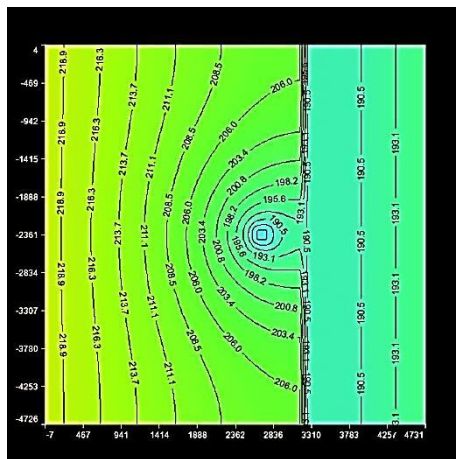
Des simulations d'approfondissement d'une carrière, exploitant une roche d'une conductivité hydraulique K_3 ($5 \cdot 10^{-5}$ m/s) mais isolée par des formations géologiques très peu perméables ($K : 1 \cdot 10^{-9}$ m/s) ont donc été réalisées (Figure V.20). Une condition « mur » de faible épaisseur (100 m) par rapport à la largeur du modèle (5 km) a été fixée à ces formations constituant des barrières hydrogéologiques. Elles limitent ainsi les écoulements souterrains et perturbent l'alimentation du réseau hydrographique.



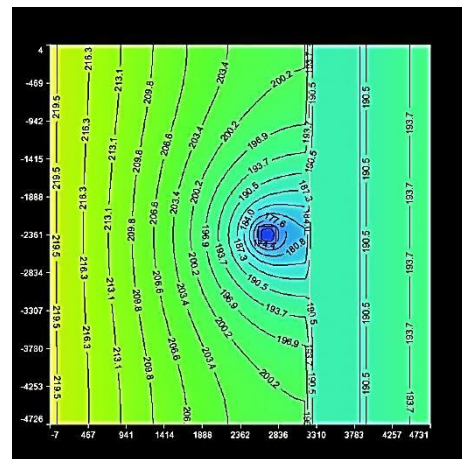
Piézométrie initiale



Palier à +200 m



Palier à +185 m



Palier à +170 m

Figure V.20 : Cartes piézométriques de la nappe d'eau souterraine en présence d'une barrière hydrogéologique, en fonction de l'approfondissement du site carrier. $K : 5.10^{-5}$ m/s, $R : 200$ mm, PI à la rivière (+190 m).

Dans le cadre de cette simulation, les précipitations (200 mm) qui alimentent la nappe en profondeur ne peuvent plus être évacuées par la rivière. Le potentiel imposé à la frontière ouest demeurant à la cote +220 m, les eaux de la nappe s'écoulent dès lors vers l'ouest. Une fois l'exploitation d'une carrière simulée, le surplus d'eau souterraine est évacué grâce à l'exhaure mise en place dans le site.

Dans le but d'illustrer la catégorie **G₃**, c'est-à-dire « **le contexte d'extension locale** » du paramètre « contexte géologique » de l'équation de l'indice d'interaction, une formation peu perméable a été simulée entre la carrière et la rivière. On constate alors que le cône de rabattement de la nappe converge de manière concentrique en direction de la formation peu perméable et un décrochement piézométrique de la nappe se met en place de part et d'autre de celle-ci. En effet, le niveau est plus élevé de 15 m à l'ouest de celle-ci lorsque que le premier palier de la carrière (+200 m) est entamé et de 2 m lorsque que le deuxième palier (+185 m) est entamé. Lorsque le troisième palier (+170 m) est entamé, le décrochement s'inverse et le niveau est plus élevé de 9 m à l'est de la formation peu perméable.

En outre, des observations similaires ont été faites pour les autres conductivités hydrauliques de roche simulées (K_1 , K_2 , K_4). La piézométrie est plus élevée à l'ouest de la formation peu perméable lors de l'approfondissement de la carrière au premier et au deuxième palier et moins élevée lors de l'approfondissement du troisième palier.

Si l'on compare les débits exhaurés lors de l'approfondissement de la carrière en présence et en absence d'une formation peu perméable (*Figure V.21*), on constate qu'ils sont plus importants lorsque la nappe souterraine ne peut être évacuée par le réseau hydrographique en aval. Comme mentionné précédemment, les précipitations et le potentiel imposé à la frontière ouest du domaine restent inchangés dans les deux scénarios. Ceci entraîne donc une hausse du niveau piézométrique de la nappe en présence de la formation peu perméable, ce qui explique que les volumes pompés dans la carrière soient plus élevés dans ce scénario précis.

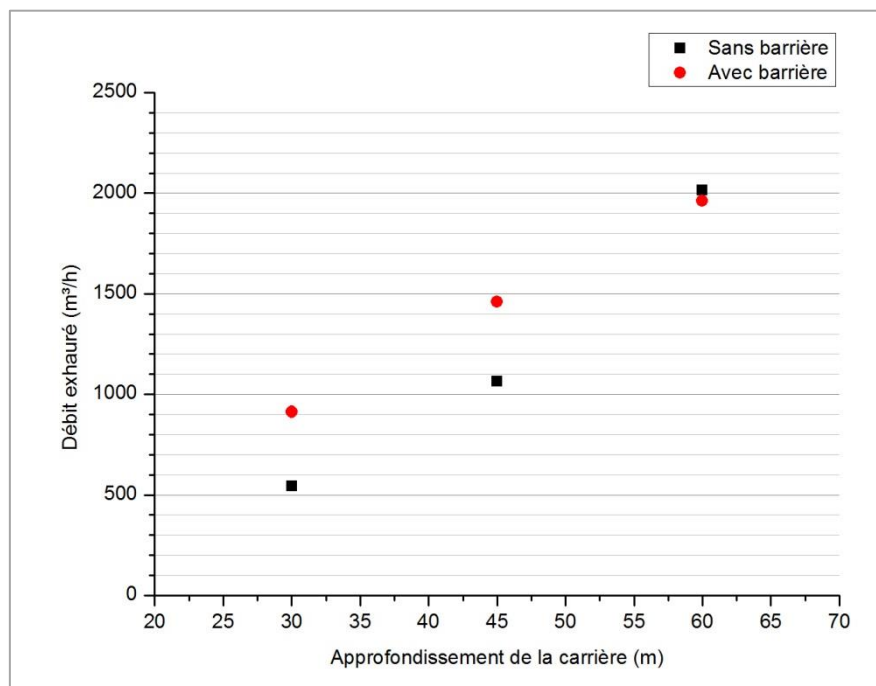
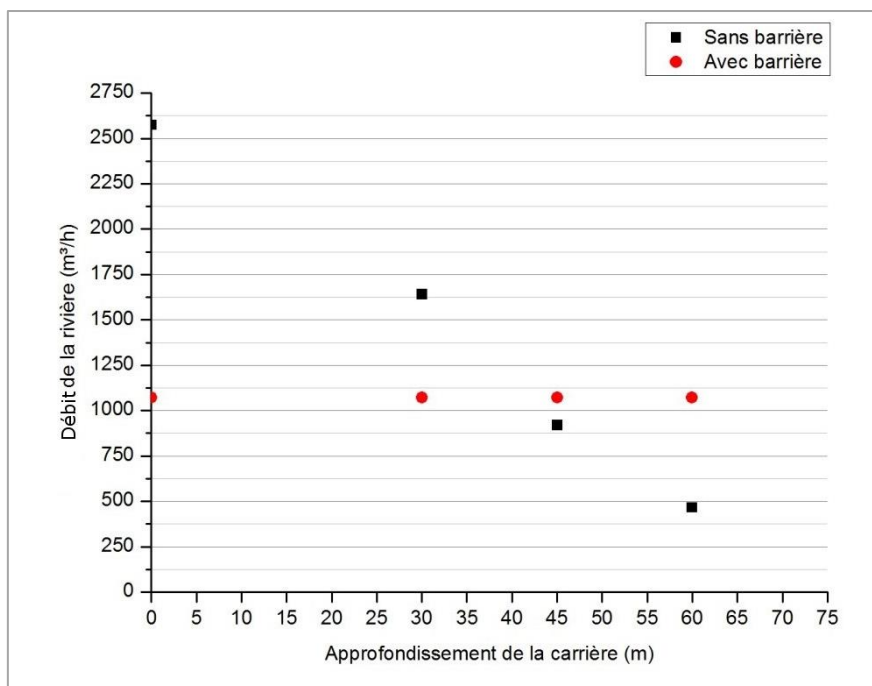


Figure V.21 : Évolution du débit exhauré dans la carrière en fonction de l'approfondissement de celle-ci (superficie de 16 ha). $K : 5.10^{-5}$ m/s, $R : 200$ mm, PI à la rivière (+190 m).

Au regard du débit de la rivière, la présence de la formation peu perméable empêchant un drainage important d'eau souterraine venue de l'amont, la rivière présente un débit de base 2,4 fois inférieur à celui de la rivière en absence de la formation, lorsque la roche exploitée dans la carrière est une formation aquifère ($K : 5.10^{-5}$ m/s) (*Figure V.22*).

En outre, on a vu précédemment que l'approfondissement et l'exhaure de la carrière avaient une réelle influence sur le débit de la rivière en absence de la formation géologique peu perméable. En effet, une décroissance du débit de la rivière d'un facteur de 3,5 au passage progressif du premier au troisième palier de la carrière est observée ; tandis qu'en présence de la formation peu perméable ($K : 1.10^{-9}$ m/s) entre le cours d'eau et l'exploitation, l'activité de la carrière a une influence minime sur l'infiltration de la rivière (variation de l'ordre de 1.10^{-3} m/s), confirmant le rôle de barrière hydrogéologique de la formation.



D'autres scénarios ont également été réalisés pour illustrer la catégorie **G₂**, c'est-à-dire « **le contexte partiellement isolé** » du paramètre « contexte géologique » de l'équation de l'indice d'interaction, en simulant la présence de deux barrières hydrogéologiques, à l'ouest et à l'est du site carrier (*Figure V.23*).

Un décrochement piézométrique est alors observé de part et d'autre des formations géologiques peu perméables ($K : 1.10^{-9}$ m/s), ce qui se traduit par un « compartimentage » de

la nappe aquifère. À nouveau, l'activité du site affecte peu la nappe souterraine et la rivière, présentes au-delà des barrières hydrogéologiques.

En conclusion, la nature des formations géologiques adjacentes à la formation géologique exploitée dans la carrière joue fortement sur les directions d'écoulement de la nappe souterraine. La présence d'une formation géologique de faible conductivité hydraulique à proximité d'une carrière réalisant de l'exhaure va rendre faible, voire nul, l'impact de l'exploitation sur les eaux présentes au-delà de cette barrière hydrogéologique.

Ainsi, le « **contexte géologique** » (**paramètre G**) de notre indice d'interaction conditionne bien l'extension du cône de rabattement lorsque de l'exhaure est réalisée dans la carrière, ainsi que l'alimentation du réseau hydrographique. Ce paramètre peut donc être décrété comme pertinent.

V.4.6 Simulations avec présence de puits pour la distribution publique

Des simulations ont été réalisées dans le but d'évaluer l'influence d'un pompage d'exhaure dans un site carrier sur des captages pour la distribution publique d'eau potable voisins. Différents captages ont été envisagés dans plusieurs scénarios afin de démontrer l'importance de leur position vis-à-vis du site carrier et des directions de l'écoulement de la nappe souterraine, modifiée par l'exploitation du site.

Ainsi des captages ont successivement été forés à 496 m à l'ouest du site, à 618 m à l'est du site et à 141 m au nord du site (*Figure V.24*).

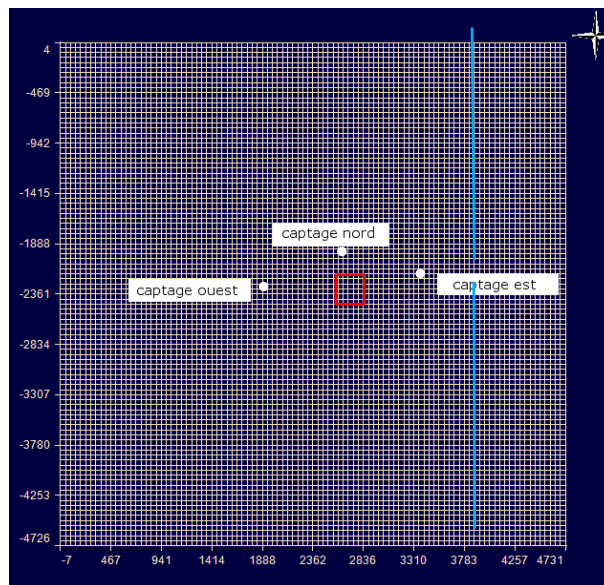
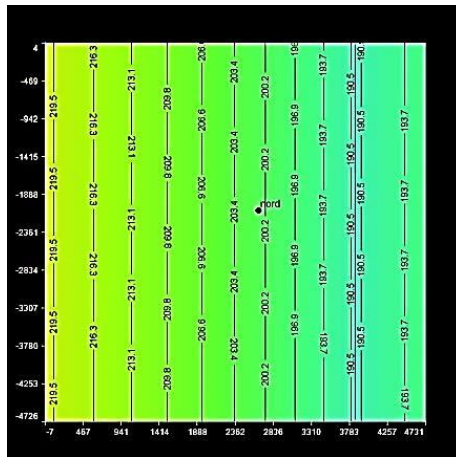
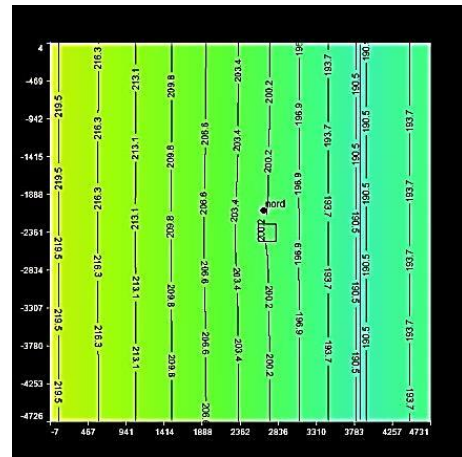


Figure V.24 : Localisation en deux et trois dimensions des captages amont, aval et nord par rapport au site carrier et à la rivière.

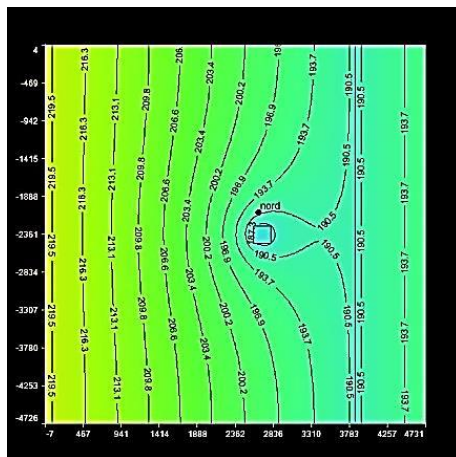
Le débit pompé dans chacun d'eux a été défini en fonction de la conductivité hydraulique de la roche choisie pour les simulations (K_3 : 5.10^{-4} m/s) ; il a été fixé à 100 m³/h. L'approfondissement de la carrière a ensuite été simulé et son impact sur la piézométrie au niveau des captages a été observé (*Figure V.25*).



Piézométrie initiale



Exploitation du premier palier



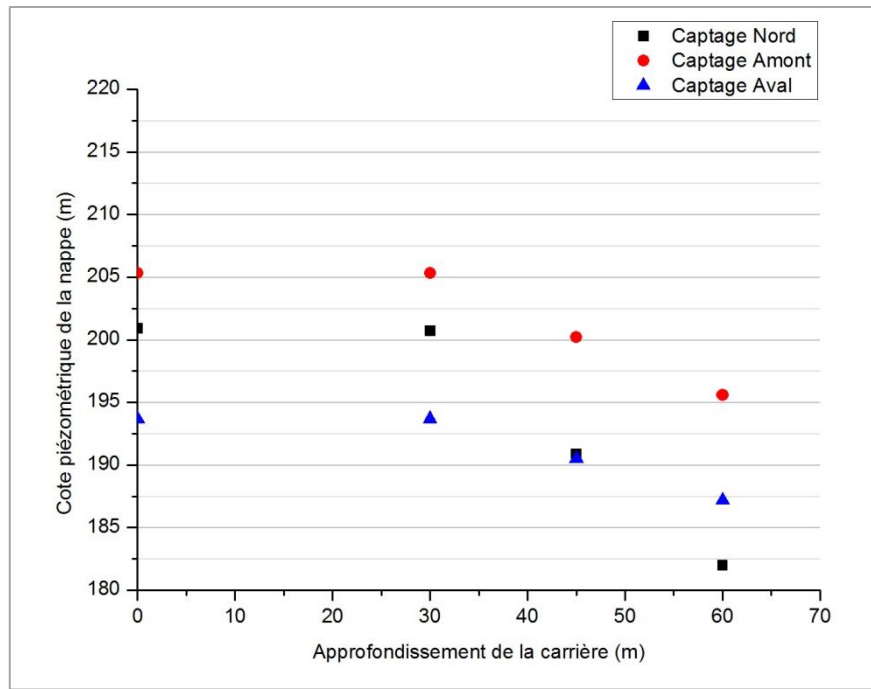


Figure V.26 : Évolution de la piézométrie au niveau des trois captages forés à proximité d'un site carrier d'une superficie de 16 ha. Q pompé aux captages : $100 \text{ m}^3/\text{h}$, $K : 5.10^{-5} \text{ m/s}$, $R : 200 \text{ mm}$, PI à la rivière (+190 m) et au plancher de la carrière (+170 m).

Des simulations similaires ont été réalisées avec des scénarios dans lesquels l'écoulement souterrain est entravé par la présence d'une formation géologique de faible conductivité hydraulique ($K : 10^{-9} \text{ m/s}$). On constate alors que le captage implanté au-delà de cette barrière hydrogéologique ne subit aucune influence en provenance de l'exploitation de la carrière (Figure V.27).

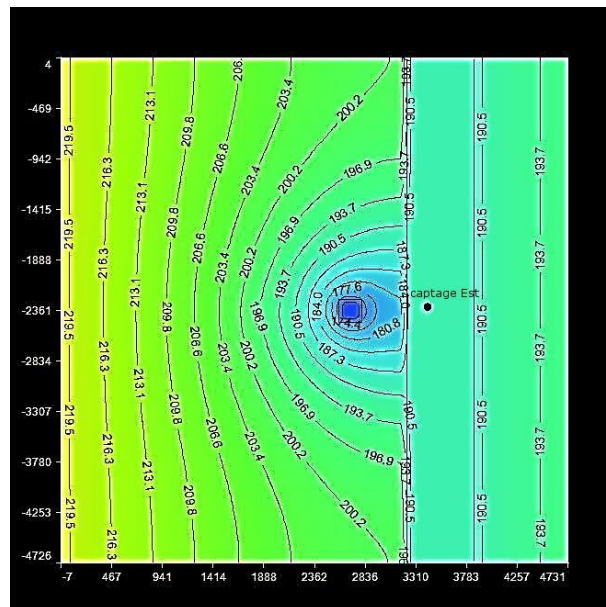


Figure V.27 : Carte piézométrique obtenue pour un scénario avec une carrière et un captage implantés de part et d'autre d'une formation géologique de faible K . Q pompé au captage : $100 \text{ m}^3/\text{h}$, $K : 5.10^{-5} \text{ m/s}$, $R : 200 \text{ mm}$, PI à la rivière (+190 m) et au plancher de la carrière (+170 m).

Il s'agit donc clairement d'une question de localisation d'implantation des captages et donc de direction d'écoulement des eaux souterraines. Étant donné l'influence de l'activité et de l'exhaure d'une carrière sur la production d'un captage voisin, l'idée de définir « **la position relative du site carrier et des captages pour la distribution publique** » (**paramètre C**) dans notre indice d'interaction semble judicieuse. Ce paramètre peut donc être décrété comme pertinent.

V.5 CONCLUSION

En conclusion, la modélisation d'une série de scénarios d'exploitation d'un site carrier ouvert à proximité d'un cours d'eau a permis une approche quantitative de quatre des six paramètres définis dans l'équation de l'indice d'interaction : le contexte hydrogéologique, le contexte géologique, le contexte piézométrique et la position relative d'un site carrier et de captages pour la distribution publique d'eau potable.

Les résultats obtenus pour la piézométrie, la variation des débits exhaérés et du débit de la rivière présente en aval, suite à une série de simulations dans lesquelles les paramètres hydrogéologiques ont été modifiés nous confortent dans nos choix. En effet,

- **la conductivité hydraulique de la roche exploitée**, assimilée au contexte hydrogéologique, joue un rôle prédominant dans l'étendue du cône de rabattement de la nappe souterraine suite à la mise en place d'exhaure, ainsi que dans les volumes d'eau exhaérés dans la carrière et dans le débit de la rivière présente en aval ;
- **l'approfondissement de la carrière**, assimilé au contexte piézométrique, exerce une influence majeure sur les débits exhaérés ainsi que sur l'étendue du cône de rabattement et l'alimentation de la rivière présente en aval ;
- **la nature du lit de la rivière** constituant le niveau de base régional, assimilé au contexte piézométrique, détermine le drainage ou l'éventuelle infiltration de la rivière lorsque le cône de rabattement, engendré par l'exhaure, s'étend en direction de la rivière.
- **l'extension de la carrière** par contre joue un rôle moindre comparé à celui de la conductivité hydraulique de la roche ou à celui de l'approfondissement du site, mais prend de l'importance lorsque la conductivité hydraulique de la roche est élevée ;
- **la présence de formations géologiques de faible conductivité hydraulique**, assimilée au contexte géologique, va régir les directions d'écoulement de la nappe souterraine et contraindre l'étendue du cône de rabattement. Ainsi l'exploitation d'un site carrier à proximité du réseau hydrographique peut être entreprise sans exercer d'influence sur ce dernier, ou encore sur des captages d'eau situés au-delà de la formation imperméable ;
- **la position des captages pour la distribution publique d'eau potable** par rapport à un site carrier exerçant de l'exhaure est déterminante dans l'impact que le site carrier a sur la production de ces captages suivant l'étendue du cône de rabattement de la nappe souterraine, le rabattement généré entraînant une diminution de la transmissivité des puits.

Les deux derniers paramètres de l'équation de l'indice d'interaction, le potentiel qualitatif de l'eau souterraine et la production des captages, n'ont pas été approchés dans la modélisation. En effet, il s'agit de paramètres économiques, plus stratégiques, pour lesquels il n'est pas justifié de réaliser des simulations.

VI VALORISATION DE L'INDICE D'INTERACTION

VI.1 INVESTIGATIONS HYDROGÉOLOGIQUES

Quatre degrés d'investigation ont été établis et correspondent à une étude de plus en plus précise. Suivant que l'indice d'interaction obtenu soit faible, moyen, fort ou très fort, la carrière étudiée sera reprise dans une des quatre classes suivantes :

○ **Low Index (LI) : une contextualisation géologique et hydrogéologique**

La contextualisation géologique et hydrogéologique consiste en une étude préliminaire synthétisant les informations existantes et les données récoltées sur le terrain, comprenant :

- le contexte topographique ;
- le contexte géologique ;
- les données piézométriques ;
- les techniques et données hydrodynamiques (essais de pompage au captage, hydrogrammes (sources, galeries captantes), diagraphies, prospections géophysiques,...) ;
- les données hydrographiques des cours d'eau environnants (débits, hydrochimie,...) ;
- des données concernant l'exploitation (cote altimétrique du fond des fosses, lithologie, géologie structurale, venues d'eau saisonnières,...) ;
- les résultats de l'approche géocentrique dans la banque de données « *Dix-Sous* » ;
- les débits d'exhaure et les chroniques (si existantes) ;
- les données sur les phénomènes karstiques (*Atlas du karst*) ;
- les données météorologiques (précipitations, températures, vitesses du vent, degré d'humidité de l'air, insolation, etc.), les débits des cours d'eau, les débits captés et la variation des réserves d'eau souterraines afin de réaliser un bilan hydrogéologique. Celui-ci permet de déterminer les potentialités en eau d'une région en quantifiant les flux d'eau souterraine vers ou à partir de bassins hydrographiques voisins. L'exploitation et l'exhaure d'une nappe aquifère modifie ce bilan.

○ **Medium Index (MI) : LI et un suivi piézométrique**

Sur base des informations récoltées pour établir le contexte hydrogéologique et géologique, sont déterminés les emplacements stratégiques pour forer des piézomètres (supplémentaires) au niveau du site carrier et en périphérie de celui-ci. Un suivi piézométrique en continu et des mesures manuelles ponctuelles sur la totalité des piézomètres régionaux existants et accessibles permettrait d'établir des chroniques piézométriques au fil des années ainsi que des cartes piézométriques de hautes et basses eaux moyennes. Si exhaure il y a, un suivi permanent du débit au puisard est imposé par le SPW.

○ **High Index (HI) : MI et une modélisation mathématique en régime permanent**

Lorsqu'un aquifère est suffisamment connu, sa bonne gestion doit être associée à la réalisation d'un modèle mathématique. Il s'agit de définir un modèle conceptuel, de réaliser et de calibrer le modèle d'écoulement et de transport, en régime permanent, sur

base de la piézométrie et des essais de pompage, de vérifier le modèle sur base du bilan hydrogéologique et de simuler différents scénarios d'exploitation de la nappe et d'exhaure. Ces modèles sont utilisés tant dans la gestion quantitative que qualitative des nappes.

○ **Very High Index (VHI) : HI et une modélisation mathématique en régime transitoire**

Dans le cas d'une modélisation en régime permanent, une valeur moyenne de la piézométrie peut suffire. Dans le cas d'une modélisation en régime transitoire, la piézométrie n'est plus considérée comme étant constante au cours de l'année hydrogéologique mais varie selon les saisons, en période de hautes eaux ou de basses eaux. Autrement dit, une plus grande rigueur dans le suivi piézométrique de la nappe au cours de l'année hydrogéologique est exigée de la part des gestionnaires.

VI.2 SONDAGE D'OPINION

Dans le but d'étayer le choix des investigations hydrogéologiques en fonction de l'indice d'interaction, un sondage d'opinion a été réalisé auprès de la communauté scientifique familière de la problématique. 28 experts belges de divers secteurs ont ainsi été sollicités :

- 7 hydrogéologues travaillant pour des compagnies de production d'eau (SWDE, CILE, Aquale, etc.) ;
- 5 chercheurs et professeurs universitaires (Universités de Liège et de Mons) ;
- 5 hydrogéologues du SPW (DGO3) ;
- 6 hydrogéologues de bureaux d'étude (ISSEP, Geolys, SGS, etc.) ;
- 5 géologues travaillant dans le secteur de l'activité extractive (Carmeuse, Lhoist, Carrières Unies de Porphyre, etc.).

Une série de 26 sites carriers théoriques (*Tableau VI.1*) a été soumise à ces scientifiques. Il leur a été demandé de déterminer le niveau de l'indice d'interaction qu'ils jugeraient convenir aux différentes combinaisons des six paramètres proposées sur base de leur expérience professionnelle et de leur intuition de scientifique, sachant qu'à chaque valeur d'indice correspondra la nécessité de réaliser une étude plus ou moins précise.

Dans le but d'obtenir des indices d'interaction moyens pour la totalité des participants, les données ont été traitées avec le logiciel Matlab (*com. pers. Moriamé 2015*), dont l'avantage réside dans le fait que la fonction « moyenne de valeurs » soit prédéfinie.

VI.2.1 Résultats obtenus pour l'ensemble des secteurs

En considérant les indices moyens pour les 28 participants et en les comparant avec les indices obtenus à l'aide du modèle, on constate que 16 des 26 combinaisons, c'est-à-dire 62%, se voient attribuer par les participants le même indice que celui obtenu avec le modèle de référence (*Tableau VI.2*). Dans ces cas-là, la différence entre l'indice d'interaction du modèle et l'indice d'interaction moyen des sondés est nulle : I.I. modèle – I.I. moyen sondés = 0.

Cas théoriques

Carrière	Hydrogéologie	Piézométrie	Géologie	Production	Qualité	Position
1	H1	P3	G3	T2	L3	C1
2	H1	P2	G2	T1	L2	C1
3	H1	P2	G2	T2	L3	C4
4	H1	P2	G4	T1	L3	C1
5	H1	P3	G4	T2	L4	C2
6	H2	P3	G1	T1	L3	C1
7	H2	P2	G3	T2	L3	C4
8	H2	P1	G3	T1	L3	C2
9	H2	P2	G4	T1	L3	C1
10	H2	P4	G4	T2	L3	C2
11	H3	P2	G2	T2	L3	C1
12	H3	P1	G2	T3	L3	C3
13	H3	P2	G3	T3	L3	C2
14	H3	P1	G3	T2	L3	C1
15	H3	P1	G3	T2	L4	C3
16	H3	P3	G4	T4	L2	C3
17	H3	P4	G4	T3	L3	C3
18	H3	P2	G4	T2	L3	C2
19	H4	P1	G1	T1	L3	C1
20	H4	P3	G2	T4	L3	C2
21	H4	P2	G2	T2	L2	C1
22	H4	P1	G3	T2	L3	C1
23	H4	P3	G3	T3	L3	C4
24	H4	P3	G4	T4	L3	C1
25	H4	P3	G4	T4	L3	C3
26	H4	P4	G4	T3	L3	C3

Rappel des paramètres

H1	Formation aquiclude
H2	Formation aquitard
H3	Formation aquifère
H4	Formation aquifère carbonaté
G1	Contexte géologique isolé
G2	Contexte géologique partiellement isolé
G3	Contexte géologique local
G4	Contexte géologique régional
P1	Cote altimétrique P > cote piézométrique N
P2	Cote altimétrique P < cote piézométrique N
P3	Cote altimétrique P < cote piézométrique N et T (NB)
P4	Cote altimétrique P < cote piézométrique N et T (≠ NB)
T1	Production des captages < 2 m³/h
T2	Production des captages entre 2 et 10 m³/h
T3	Production des captages entre 10 et 30 m³/h
T4	Production des captages > 30 m³/h
L1	Eau à hauts risques
L2	Eau nécessitant un traitement
L3	Eau de bonne qualité
L4	Eau de qualité exceptionnelle
C1	Carrière hors zone d'alimentation des captages
C2	Carrière dans la zone d'alimentation des captages
C3	Carrière dans la zone de prévention IIb des captages
C4	Carrière dans la zone de prévention IIa des captages

Tableau VI.1 : Association de paramètres de l'indice carrière et l'indice masse d'eau souterraine pour 26 carrières théoriques.

Carrière	I.I. modèle	I.I. moyen sondés	I.I. modèle – I.I. moyen sondés
1	1	1	0
2	1	1	0
3	3	2	1
4	1	1	0
5	3	2	1
6	1	1	0
7	3	3	0
8	1	1	0
9	1	1	0
10	3	3	0
11	2	2	0
12	3	2	1
13	4	2	2
14	1	1	0
15	3	2	1
16	4	3	1
17	4	4	0
18	3	2	1
19	1	1	0
20	4	3	1
21	1	2	-1
22	1	1	0
23	4	4	0
24	4	3	1
25	4	4	0
26	4	4	0

Tableau VI.2 : Comparaison des indices d'interaction obtenus à l'aide du modèle avec les indices d'interaction moyens pour l'ensemble des sondés. Indice low = 1, indice medium = 2, indice high = 3, indice very high = 4.

Dans neuf des dix cas pour lesquels l'indice ne concorde pas exactement, l'indice obtenu avec le modèle est plus exigeant. Dès lors, la différence entre l'indice d'interaction du modèle et l'indice d'interaction moyen des sondés est supérieure à 0 : I.I. modèle – I.I. moyen sondés = 1 (dans huit cas) et 2 (dans un cas).

Dans le seul cas pour lequel l'indice obtenu avec le modèle est moins exigeant, la différence entre l'indice d'interaction du modèle et l'indice d'interaction moyen des sondés est inférieure à 0 : I.I. modèle – I.I. moyen sondés = -1.

En outre, l'avantage de travailler avec le modèle des choix discrets est qu'il ne fournit pas un indice spécifique mais bien des probabilités pour chacun des quatre indices (low, medium, high et very high). Dès lors, on a considéré qu'il serait intéressant de fusionner le nombre de réponses des indices dont la probabilité est supérieure à 25%. Autrement dit, il s'agit d'additionner le nombre de réponses dont l'indice attribué est similaire à celui obtenu avec le modèle avec le nombre de réponses dont l'indice attribué présente au moins 25% de chances d'être l'indice qu'il aurait été judicieux de choisir.

Illustrons l'idée avec un exemple de carrière pour laquelle le modèle fournit les probabilités suivantes :

- $P(\text{low}) = 0$;
- $P(\text{medium}) = 0,36$;
- $P(\text{high}) = 0,63$;
- $P(\text{very high}) = 0,01$.

L'indice obtenu à l'aide du modèle et attribué à la carrière étudiée est donc « high ». Maintenant, étant donné que la probabilité que l'indice soit « medium » est supérieure à 0,25, on décide d'intégrer le nombre de réponses des sondés ayant attribué cet indice à la carrière au nombre de réponses pour lesquelles l'indice était exactement similaire. En procédant de la sorte, on augmente le nombre de combinaisons à l'indice concordant de 16 à 20 sur 26, c'est-à-dire que l'on passe de 62% à 77% des combinaisons. Dans les 23% des autres cas, l'indice que l'on obtient avec le modèle est légèrement plus élevé.

Par ailleurs, si l'on considère qu'il n'existe que deux étapes principales dans les investigations de l'étude d'incidence d'un site carrier, d'une part la **surveillance** par **collecte de données** (LI et MI) et d'autre part, la **prévision** par **modélisation** (HI et VHI), la concordance entre les réponses des scientifiques et celles obtenues avec le modèle est encore plus élevée. En effet, il n'y a désaccord plus que pour trois combinaisons, ce qui correspondant dès lors à une correspondance des indices pour 88% des combinaisons.

Lorsque l'on analyse dans le détail les indices d'interaction attribués par les 28 scientifiques interrogés, on observe que huit combinaisons suscitent des opinions assez différentes (*Figure VI.1*). En effet, chacune des huit combinaisons s'est vue attribuer un indice d'interaction s'échelonnant de « low » à « very high ».

Néanmoins, en ne prenant pas en compte les combinaisons pour lesquelles un seul participant a émis un avis divergent (les combinaisons 7, 13, 15, 18, 21, 22), il ne reste plus que deux combinaisons : les 3 et 24. Cette interprétation variée parmi les sondés pourrait être expliquée par le fait que la carrière 3 ($H_1, P_2, G_2, T_2, L_3, C_4$) et la carrière 24 ($H_4, P_3, G_4, T_4, L_3, C_1$) présentent chacune une association contrastée des paramètres « contexte hydrogéologique » (respectivement H_1 : formation aquiclude et H_4 : formation aquifère carbonaté) et « position relative entre le site carrier et les captages pour la distribution » (respectivement C_4 : carrière ouverte dans la zone de protection IIa d'un captage et C_1 : hors zone d'alimentation d'un captage). Certains scientifiques auront plutôt attribué du poids à l'un ou à l'autre des paramètres pour prendre leur décision.

VI.2.1 Résultats obtenus par secteur

Une approche par secteur a été réalisée. Cependant, vu le faible et inégal nombre de participants par secteur, nous avons considéré qu'une approche statistique donnerait des résultats biaisés. On peut néanmoins noter que notre vision des investigations nécessaires à réaliser pour l'exploitation d'un site carrier est assez similaire à celle des producteurs d'eau, des bureaux d'étude et des chercheurs universitaires.

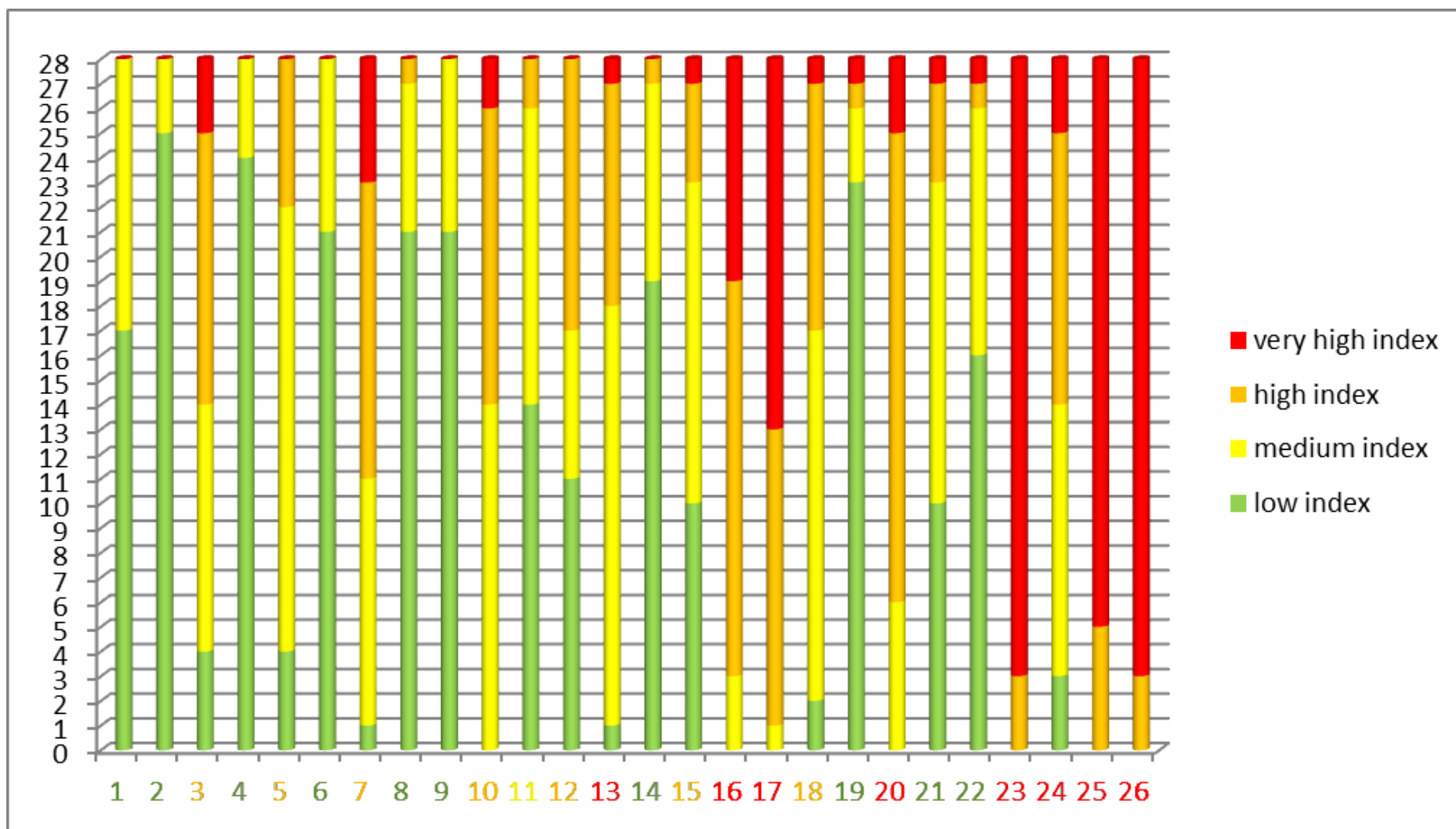


Figure VI.1 : Ensemble des indices d'interaction attribués par chacun des 28 participants aux 26 carrières théoriques. En abscisse chaque combinaison proposée apparaît dans la couleur de l'indice d'interaction attribué par le modèle.

On constate néanmoins en analysant les combinaisons dont les réponses des participants inter-secteurs sont fort différentes (les carrières 21, 22 et 24) que deux paramètres semblent susciter des divergences d'opinion. Il s'agit du contexte hydrogéologique et de la position relative du site carrier et des captages pour la distribution publique est « hors zone d'alimentation ».

- Pour la carrière 21 ($H_4, P_2, G_2, T_2, L_2, C_1$), nous avons attribué un indice d'interaction « low ». Les paramètres qui ont été déterminants dans notre modèle sont le contexte géologique (« contexte partiellement isolé »), la production des captages (« production comprise entre 2 et 10 m³/h ») et la position relative du site carrier et des captages pour la distribution publique (« carrière hors zone d'alimentation des captages »). Le seul paramètre pouvant avoir incité certains scientifiques à attribuer un indice d'interaction « very high » à cette carrière est le contexte hydrogéologique (« formation aquifère carbonaté »).
- Pour la carrière 22 ($H_4, P_1, G_3, T_2, L_3, C_1$), nous avons attribué un indice d'interaction « low ». Les paramètres qui ont été déterminants dans notre modèle sont le contexte piézométrique (« contexte $P > N$ ») et la position relative du site carrier et des captages pour la distribution publique (« carrière hors zone d'alimentation des captages »). Le seul paramètre pouvant avoir incité certains scientifiques à attribuer un indice d'interaction « very high » à cette carrière est le contexte hydrogéologique (« formation aquifère carbonaté »).
- Pour la carrière 24 ($H_4, P_3, G_4, T_4, L_3, C_1$), nous avons attribué un indice d'interaction « very high ». Les paramètres qui ont été déterminants dans notre modèle sont le contexte hydrogéologique (« aquifère carbonaté »), le contexte géologique (« contexte extension régionale ») et la production des captages (« production des captages supérieure à 30 m³/h »). Le seul paramètre pouvant avoir incité certains scientifiques à attribuer un indice d'interaction « low » à cette carrière est la position relative du site carrier et des captages pour la distribution publique (« carrière hors zone d'alimentation des captages »).

On en conclut que les notions d'« aquifère carbonaté » et de « carrière hors zone d'alimentation des captages » constituent des paramètres pouvant ne pas être appréhendés de la même façon par tous les scientifiques.

VI.2.2 Conclusion

Le sondage d'opinion réalisé auprès de la communauté scientifique s'est révélé très intéressant et les résultats corroborent le bien-fondé de notre méthodologie. Suivant la façon dont on interprète les réponses des participants, la concordance entre l'indice d'interaction obtenu avec le modèle et l'indice d'interaction moyen des sondés est de 62 à 88%. On observe que de manière générale nous nous mettons du côté sécurité en attribuant un indice d'interaction légèrement plus exigeant que la moyenne des scientifiques.

VII APPLICATION À DES CAS CONCRETS

Après avoir démontré le bien-fondé des paramètres ayant servi à établir l'indice d'interaction, il serait intéressant d'appliquer cet indice à des cas concrets de sites carriers wallons, afin de voir si les investigations suggérées sont du même degré d'exigence que celles qui ont déjà été imposées aux exploitants par la Région wallonne.

Dès lors, deux carrières dont la connaissance de l'hydrogéologie régionale et locale est élevée et pour lesquelles une étude d'incidence a déjà été réalisée ont été choisies. Leurs contextes géologiques et hydrogéologiques différents ont permis d'illustrer les paramètres utilisés dans l'indice carrière et dans l'indice masse d'eau souterraine.

VII.1 LA CARRIÈRE DE LA BOVERIE

VII.1.1 Introduction

La carrière de la Boverie se situe sur le plateau du Gerny, massif calcaire localisé entre les villes de Rochefort et Jemelle au sud-ouest, et les villages d'Hargimont à l'est et d'Humain au nord (*Figure VII.1*). Le plateau du Gerny se trouve en Calestienne, seuil topographique (de 250 à 300 m) limité au nord par la plaine de la Fagne-Famenne et au sud par le plateau ardennais.

À l'ouest de la carrière, le ruisseau du Biran, affluent de la Lomme, s'écoule du nord-est vers le sud-ouest, en direction de Rochefort. Les calcaires frasniens exploités par le groupe carrier Lhoist dans la carrière de la Boverie et l'eau souterraine de cet aquifère exploitée à la source de Tridaine sont au centre d'enjeux économiques importants. En effet, ces calcaires possèdent une pureté telle qu'ils sont utilisés pour la fabrication de chaux. La source de Tridaine, qui résulte d'un débordement ponctuel de la nappe d'eau souterraine contenue au sein des calcaires frasniens, alimente l'abbaye Saint-Rémy et assure l'alimentation en eau potable de l'agglomération de Rochefort.

Afin de déterminer les investigations utiles de réaliser pour mieux appréhender le contexte hydrogéologique de ce site d'étude et ainsi assurer la continuité de l'exploitation de la carrière en apportant les mesures nécessaires pour conserver un apport régulier en eau potable, l'indice d'interaction précédemment défini a été appliqué.

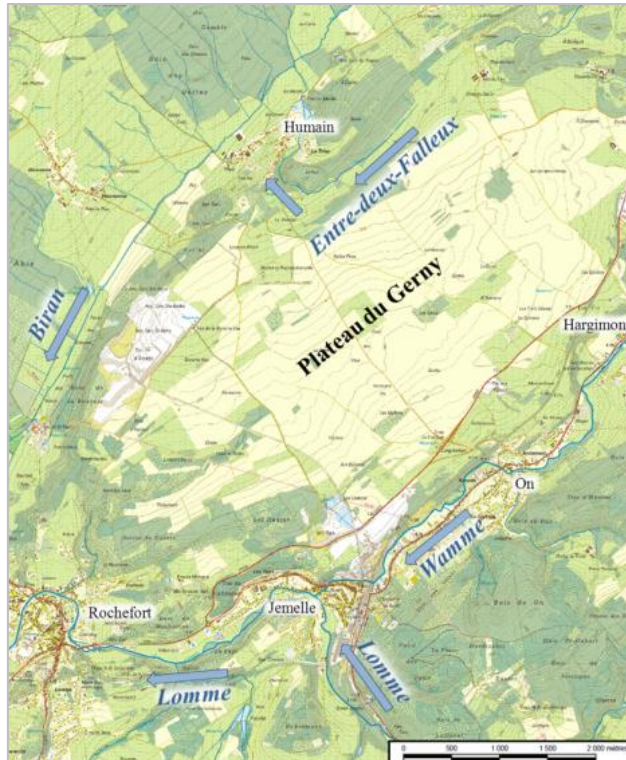


Figure VII.1 : Contexte topographique et hydrographique du plateau du Gerny.

VII.1.2 Les paramètres de l'indice carrière

VII.1.2.1 Le contexte géologique

Le plateau du Gerny est localisé en bordure méridionale du Synclinorium de Dinant (*Belanger et al. 2012*). Ce massif calcaire présente une morphologie elliptique qui résulte du double ennoyage vers le nord-est et vers le sud-ouest de l'anticlinal du Gerny (*Figure VII.2*). La carrière de la Boverie et la source de Tridaine sont localisées au sud du flanc nord-ouest de l'anticlinal. La direction générale des couches oscille autour de N35°E et la valeur angulaire du pendage varie entre 35 et 60° vers le nord-ouest. Deux failles longitudinales jouent un rôle non négligeable dans l'hydrogéologie locale : une faille inverse est observée dans la carrière et une faille de rétro-charriage affecte le flanc nord-ouest de l'anticlinal dans l'ancienne carrière Sainte-Anne.

Les formations géologiques qui constituent l'anticlinal du Gerny sont des dépôts sédimentaires datant du Givetien et du Frasnien (Dévonien moyen et supérieur). La géologie de l'étage Frasnien résulte d'une succession d'épisodes de bioconstructions carbonatées interrompus par un apport de sédiments détritiques (*Boulvain et al. 2005*).

Dans la carrière de la Boverie, sont exploitées deux grandes lentilles de calcaires biohermaux : le Membre de l'Arche et le Membre du Lion, qui font respectivement partie de la Formation du Moulin-Liénaux et de la Formation des Grands-Breux (*Bultynck et Dejonghe 2001*). Leur extension est limitée par des formations schisteuses : la Formation de Nismes, au sud et la Formation de Neuville, au nord. Dans le sens des couches, les lentilles se prolongent par les calcaires du Membre de Bieumont.

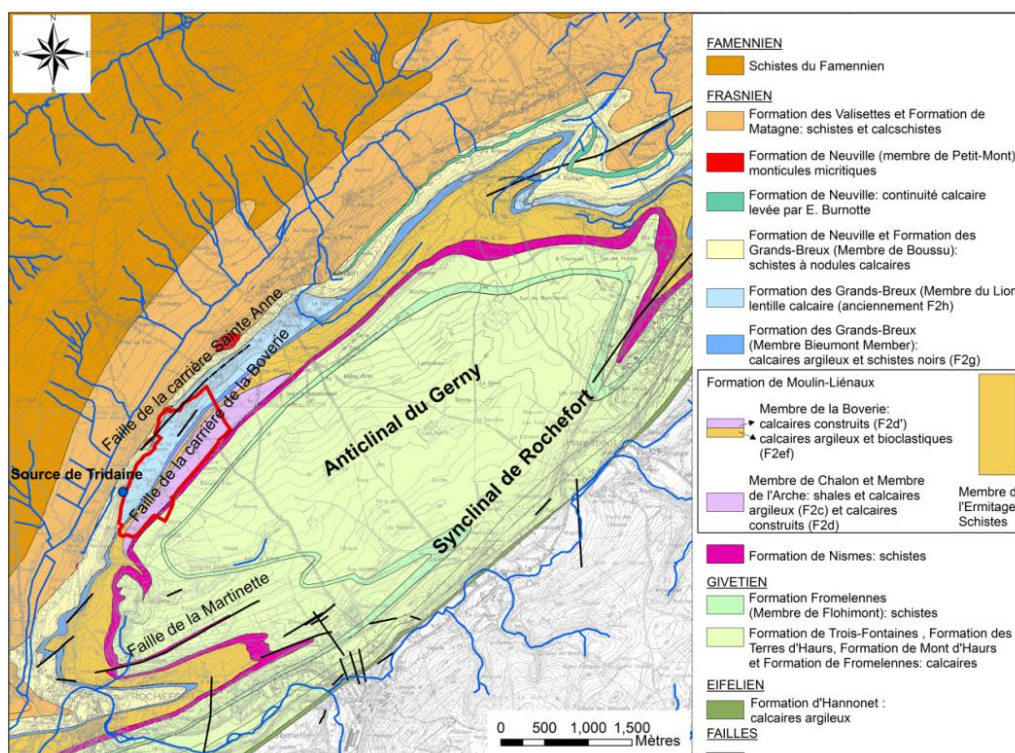


Figure VII.2 : Contexte géologique et structural de la zone d'étude.

Il est dès lors considéré pour le calcul de l'équation de l'indice d'interaction que l'exploitation est ouverte dans une formation dont l'extension (3,2 km²) est limitée latéralement par des formations géologiques de faible conductivité hydraulique. Par conséquent, la carrière rentre dans la catégorie « **contexte partiellement isolé** » et on lui attribue dans l'équation de l'indice d'interaction une valeur de 1 à G₂.

VII.1.2.2 Le contexte hydrogéologique

Les hétérogénéités lithologiques du plateau du Gerny et l'abondance des phénomènes karstiques au sein des formations calcaires du massif caractérisent l'unité aquifère de la Boverie (Hallet et Meus 2011). Elle s'étend au nord-ouest de l'unité aquifère du Gerny (Figure VII.3). Son exutoire principal, la source de Tridaine, se situe en rive gauche de la vallée du Biran, au sein d'une ancienne galerie d'exhaure d'une exploitation de galène, à la cote +211,5 m.

Les phénomènes karstiques, observés dans l'unité aquifère de la Boverie et répertoriés dans l'Atlas du Karst wallon (Michel et Thys 2015), sont la perte du ruisseau de l'Entre-deux-Falleux, qui traverse l'extrémité nord-est de la lentille calcaire du Lion et son émergence, située à Humain, n'est active qu'uniquement en période de hautes eaux. Il est dès lors considéré pour le calcul de l'équation de l'indice d'interaction que la carrière rentre dans la catégorie « **contexte aquifère carbonaté** » à laquelle on attribue une valeur de 1 à H₄.

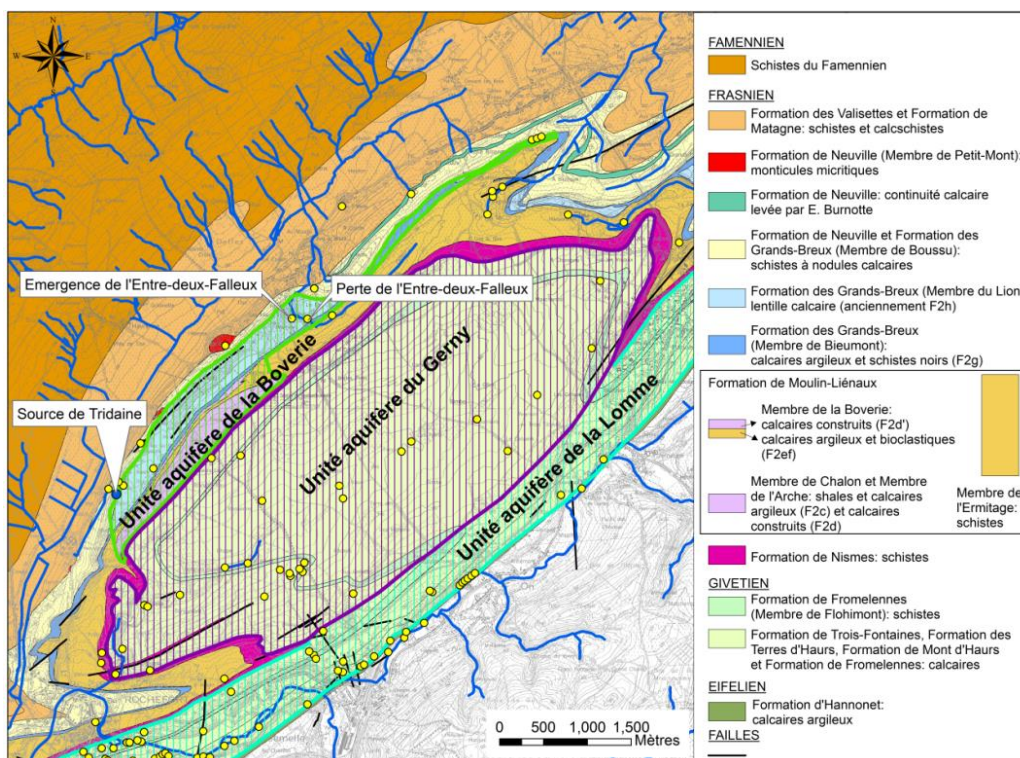


Figure VII.3 : Contexte hydrogéologique de la zone d'étude.

VII.1.2.3 Le contexte piézométrique

De nombreux ouvrages, tels que des puits de particuliers et les piézomètres de la carrière de la Boverie, résultant d'études antérieures, sont implantés sur le Plateau du Gerny. Actuellement les lentilles calcaires sont exploitées à une cote altimétrique supérieure (+220 m) à celle de la nappe d'eau souterraine et à celle de son exutoire (+211,5 m), ce qui est pris en compte pour le calcul de l'équation de l'indice d'interaction. En effet, la carrière rentre dans la catégorie « **cote du plancher > cote de la nappe** » et on lui attribue une valeur de 1 à P_1 dans l'équation de l'indice d'interaction.

La morphologie du gisement calcaire est telle qu'un approfondissement de la fosse d'extraction jusqu'à une cote altimétrique de +160 m est envisagé par l'exploitant. Le plancher inférieur atteindrait ainsi une altitude nettement inférieure à la cote altimétrique actuelle de la nappe aquifère et à la source de Tridaine qui, constituant l'exutoire de l'aquifère de la Boverie, peut être considéré comme le niveau de base de la nappe.

La mise en place d'exhaure serait donc indispensable pour poursuivre l'exploitation de la roche à sec. Ce pompage permanent entraînerait cependant une modification de la piézométrie régionale avec pour conséquence l'assèchement de la source de Tridaine. Dès lors, il serait nécessaire de trouver une alternative à l'approvisionnement en eau de la Ville de Rochefort et de l'abbaye.

VII.1.2.1 Indice carrière

- Dans l'état actuel d'exploitation de la carrière, on obtient l'indice carrière « medium » (*Tableau VII.1*).

		Contexte géologique					
		Totalement isolé	Partiellement isolé	Extension locale	Extension régionale		
Contexte hydrogéologique	Aquifère carbonaté					$P = N < T$ ($\neq NB$)	Contexte piézométrique
						$P = N < T$ ($=NB$)	
						$P = N > T$	
			x			$P > N$	
	Aquifère					$P = N < T$ ($\neq NB$)	
						$P = N < T$ ($=NB$)	
						$P = N > T$	
						$P > N$	
	Aquitard					$P = N < T$ ($\neq NB$)	
						$P = N < T$ ($=NB$)	
						$P = N > T$	
						$P > N$	
	Aquiclude					$P = N < T$ ($\neq NB$)	
						$P = N < T$ ($=NB$)	
						$P = N > T$	
						$P > N$	

Tableau VII.1 : Indice carrière pour la carrière de la Boverie dans l'état actuel d'exploitation (x).

- En cas d'approfondissement de la carrière jusqu'à la cote +160 m, l'indice carrière doit être recalculé. On obtient dès lors un indice carrière « very high » (*Tableau VII.2*).

		Contexte géologique					
		Totalement isolé	Partiellement isolé	Extension locale	Extension régionale		
Contexte hydrogéologique	Aquifère carbonaté		x			$P = N < T$ ($\neq NB$)	Contexte piézométrique
						$P = N < T$ ($=NB$)	
						$P = N > T$	
						$P > N$	
	Aquifère					$P = N < T$ ($\neq NB$)	
						$P = N < T$ ($=NB$)	
						$P = N > T$	
						$P > N$	
	Aquitard					$P = N < T$ ($\neq NB$)	
						$P = N < T$ ($=NB$)	
						$P = N > T$	
						$P > N$	
	Aquiclude					$P = N < T$ ($\neq NB$)	
						$P = N < T$ ($=NB$)	
						$P = N > T$	
						$P > N$	

Tableau VII.2 : Indice carrière pour la carrière de la Boverie en cas d'approfondissement (x).

VII.1.3 Les paramètres de l'indice masse d'eau souterraine

VII.1.3.1 La position relative du site carrier et des captages

La carrière de la Boverie est ouverte dans les calcaires frasniens dont la source de Tridaine constitue l'exutoire de la nappe aquifère. Par conséquent, elle se trouve dans sa zone d'alimentation. Les traçages réalisés récemment ont montré des temps de transfert inférieurs à 24 heures entre certains piézomètres de la carrière et la source de Tridaine. Par conséquent, le site carrier se situe dans la zone de protection IIa proposée de la source. En effet, la zone de prévention de la source de Tridaine (code : AC_ROCHEFORT02) est à l'enquête publique et n'est pas encore arrêtée (date d'ouverture de l'enquête : 15/01/2014). Par conséquent, la carrière rentre dans la catégorie « **contexte zone IIa** » et on lui attribue dans l'équation de l'indice d'interaction une valeur de 1 à C₄.

VII.1.3.2 La production des captages

Il s'agit ici de la production de la source de Tridaine. Son débit moyen annuel est compris entre 70 m³/h et 100 m³/h. La production de la source de Tridaine étant supérieure à 30 m³/h, il est dès lors considéré pour le calcul de l'équation de l'indice d'interaction que la carrière rentre dans la catégorie « **production supérieure à 30 m³/h** » et on lui attribue une valeur de 1 à T₄ dans l'équation de l'indice d'interaction.

VII.1.3.3 Le potentiel qualitatif de l'eau souterraine

L'eau de la source ne requière aucun traitement chimique additionnel pour assurer sa potabilité. Il est dès lors considéré pour le calcul de l'équation de l'indice d'interaction que la carrière rentre dans la catégorie « **eau de bonne qualité** » et on lui attribue une valeur de 1 L₃ dans l'équation de l'indice d'interaction.

VII.1.3.4 Indice masse d'eau souterraine

En combinant les trois paramètres de l'indice masse d'eau souterraine, on obtient l'indice « very high » (Tableau VII.3).

		Potentiel qualitatif de l'eau souterraine					
		A hauts risques	Potabilisable	De bonne qualité	De qualité exceptionnelle		
Productivité de la formation hydrogéologique	> 30 m³/h			x		Zone IIa	Position relative du site et des captages
						Zone IIb	
						Alimentation	
						Hors zone	
	10 - 30 m³/h					Zone IIa	
						Zone IIb	
						Alimentation	
						Hors zone	
	2 - 10 m³/h					Zone IIa	
						Zone IIb	
						Alimentation	
						Hors zone	
	< 2 m³/h					Zone IIa	
						Zone IIb	
						Alimentation	
						Hors zone	

Tableau VII.3 : Indice masse d'eau souterraine pour la carrière de la Boverie dans l'état actuel d'exploitation (x).

VII.1.4 L'indice d'interaction

Dans le contexte d'exploitation actuel de la carrière de la Boverie, en combinant les paramètres de l'indice carrière et de l'indice masse d'eau souterraine dans les équations de l'indice d'interaction, on obtient les résultats suivants :

$$L = 0$$

$$M = -9.30 + 0 * 0 - 0.05 * 0 + 2.96 * 0 + 2.96 * 1 + 0 * 1 + 2.24 * 0 + 4.72 * 0 + 4.61 * 0 + 0 * 0 - 0.62 * 1 - 0.64 * 0 - 0.68 * 0 + 0 * 0 + 3.29 * 0 + 5.40 * 0 + 5.40 * 1 + 0 * 0 + 0.46 * 0 + 1.72 * 0 + 4.55 * 1 + 0 * 0 + 4.12 * 0 + 4.68 * 1 + 4.83 * 0 = 7.67$$

$$H = -2.09 + 0.82 * 0 - 0 * 0 + 5.15 * 0 + 5.15 * 1 - 5.36 * 1 + 0 * 0 + 3.93 * 0 + 3.82 * 0 + 0.5 * 0 + 0 * 1 - 0.02 * 0 - 0.03 * 0 - 6.94 * 0 + 0 * 0 + 5 * 0 + 5.36 * 1 - 3.57 * 0 + 0 * 0 + 2.98 * 0 + 6.5 * 1 - 7.23 * 0 + 0 * 0 + 1.92 * 1 + 3.24 * 0 = 11.48$$

$$VH = 24.6 - 7.45 * 0 - 9.13 * 0 + 0 * 0 + 0 * 1 - 17.2 * 1 - 7.89 * 0 + 0 * 0 - 0.11 * 0 - 0.49 * 0 + 0.02 * 1 + 0 * 0 + 0.04 * 0 - 23.9 * 0 - 8.62 * 0 + 0 * 0 + 0.788 * 1 - 13.2 * 0 - 6.28 * 0 + 0 * 0 + 2.52 * 1 - 14.1 * 0 - 3.73 * 0 + 0 * 1 + 3.36 * 0 = 10.728$$

Les résultats sont ensuite insérés dans les équations de probabilités. L'équation dont la probabilité est la plus élevée attribue son indice d'interaction au site carrier.

$$\begin{aligned}
P(L) &= \frac{e^0}{e^0 + e^{7.67} + e^{11.48} + e^{10.728}} = 0 \\
P(M) &= \frac{e^{7.67}}{e^0 + e^{7.67} + e^{11.48} + e^{10.728}} = 0.01 \\
P(H) &= \frac{e^{8.8}}{e^0 + e^{7.67} + e^{11.48} + e^{10.728}} = 0.67 \\
P(VH) &= \frac{e^{10.728}}{e^0 + e^{7.67} + e^{11.48} + e^{10.728}} = 0.32
\end{aligned}$$

L'indice d'interaction obtenu est « high ». Il est donc conseillé à l'exploitant de réaliser une contextualisation géologique et hydrogéologique, un suivi piézométrique de la nappe d'eau souterraine concernée par l'exploitation, ainsi que de mettre au point une modélisation en régime permanent.

En cas d'approfondissement de la carrière sous le niveau de la nappe la carrière, le paramètre P (contexte piézométrique) passera de la catégorie P₁ (« N < P ») à la catégorie P₄ (« P = N < T (≠NB) »). Dès lors, l'indice d'interaction sera recalculé.

$$L = 0$$

$$\begin{aligned}
M = & -9.30 + 0 * 0 - 0.05 * 0 + 2.96 * 0 + 2.96 * 1 + 0 * 0 + 2.24 * 0 + 4.72 * 0 + 4.61 * 1 + 0 * 0 - \\
& 0.62 * 1 - 0.64 * 0 - 0.68 * 0 + 0 * 0 + 3.29 * 0 + 5.40 * 0 + 5.40 * 1 + 0 * 0 + 0.46 * 0 + 1.72 * 0 + 4.55 * \\
& 1 + 0 * 0 + 4.12 * 0 + 4.68 * 1 + 4.83 * 0 = 12.28
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H = & -2.09 + 0.82 * 0 - 0 * 0 + 5.15 * 0 + 5.15 * 1 - 5.36 * 0 + 0 * 0 + 3.93 * 0 + 3.82 * 1 + 0.5 * 0 + 0 * \\
& 1 - 0.02 * 0 - 0.03 * 0 - 6.94 * 0 + 0 * 0 + 5 * 0 + 5.36 * 1 - 3.57 * 0 + 0 * 0 + 2.98 * 0 + 6.5 * 1 - 7.23 * \\
& 0 + 0 * 0 + 1.92 * 1 + 3.24 * 0 = 20.66
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
VH = & 24.6 - 7.45 * 0 - 9.13 * 0 + 0 * 0 + 0 * 1 - 17.2 * 0 - 7.89 * 0 + 0 * 0 - 0.11 * 1 - 0.49 * 0 + 0.02 * \\
& 1 + 0 * 0 + 0.04 * 0 - 23.9 * 0 - 8.62 * 0 + 0 * 0 + 0.788 * 1 - 13.2 * 0 - 6.28 * 0 + 0 * 0 + 2.52 * 1 - \\
& 14.1 * 0 - 3.73 * 0 + 0 * 1 + 3.36 * 0 = 27.818
\end{aligned}$$

Les résultats sont ensuite insérés dans les équations de probabilités.

$$\begin{aligned}
P(L) &= \frac{e^0}{e^0 + e^{12.28} + e^{20.66} + e^{27.818}} = 0 \\
P(M) &= \frac{e^{7.67}}{e^0 + e^{12.28} + e^{20.66} + e^{27.818}} = 0 \\
P(H) &= \frac{e^{8.8}}{e^0 + e^{12.28} + e^{20.66} + e^{27.818}} = 0 \\
P(VH) &= \frac{e^{10.728}}{e^0 + e^{12.28} + e^{20.66} + e^{27.818}} = 1
\end{aligned}$$

La probabilité la plus élevée étant celle de l'indice d'interaction « very high », l'exploitant devra réaliser une modélisation mathématique en régime permanent et en régime transitoire.

VII.1.5 Investigations réalisées

Le groupe carrier Lhoist avait entrepris une étude hydrogéologique dans les années 90 (*Tractebel 1997*). Actuellement, dans le cadre du futur projet d'approfondissement, le groupe carrier a réalisé une étude détaillée de la région.

- Une *étude bibliographique* notamment sur l'historique de l'exploitation de la source de Tridaine.
- Un *levé géologique* a permis d'évaluer la continuité latérale des shales de la Formation de Nismes qui compartimente au sud-est l'unité aquifère de la Boverie de l'unité aquifère du Gerny et la présence des shales du Membre de Boussu (*Marion et al. 2011*).
- Une vingtaine de tomographies électriques ont été réalisées sur la bordure méridionale du plateau du Gerny afin de préciser la géologie locale en dehors des zones d'affleurement rocheux (*Bureau Conseil en Géologie SPRL 2008; Collier 2009; De Vroey 2010*). Ces *prospections géophysiques* ont confirmé la continuité de formations qui vont jouer un rôle important dans la compartimentation hydrogéologique: la Formation de Nismes, qui isole l'aquifère des calcaires frasniens de l'aquifère des calcaires givetiens et la Formation de Neuville qui délimite le toit du gisement calcaire frasnien, au nord.
- Des *bilans hydrogéologiques* ont été réalisés à l'échelle mensuelle. Ils soulignent que l'épisode de recharge maximale de la nappe d'eau souterraine est condensé sur trois mois (novembre, décembre et janvier) (*Bonniver et al. 2012*). Le restant de l'année est essentiellement caractérisé par un processus de vidange, sans toutefois que la recharge ne soit nulle, témoignant de la bonne conductivité hydraulique globale, et par conséquent du bon drainage des lentilles calcaires, notamment en l'absence de végétation au niveau de la carrière.

Le bilan hydrogéologique pour la période comprise entre le 04/08/2010 et le 25/10/2011 :

$$P - ETR - \Delta RFU = EU = Q_{\text{Entre-deux-Falleux}} + Q_{\text{Source de Tridaine}} + \Delta RES_{\text{nappe}} + \text{fermeture}$$

$$287\text{mm} = 66\text{mm} + 256\text{mm} - 3.2\text{mm} - 31.8\text{mm}$$

- P : les précipitations ;
- ETR : l'évapotranspiration réelle ;
- Q : le débit ;
- RFU : la réserve facilement utilisable, c'est-à-dire le stock d'humidité du sol, pour l'année hydrogéologique considérée ;
- RES : les réserves de l'aquifère pour l'année hydrogéologique considérée.

Le terme de fermeture négatif de l'équation traduit un très léger excédent d'écoulement de la source de Tridaine. Cet excédent a été interprété comme une venue d'eau latérale en provenance du Membre de Bieumont (Formation des Grands Breux), localisé à l'extrémité nord-est de la zone d'alimentation. Cela signifie que le bassin d'alimentation de la source de Tridaine n'est pas complètement isolé par les formations imperméables limitrophes même s'il fonctionne en système quasi fermé, ce qui confirme la classification du site carrier dans la catégorie G₂ (« contexte partiellement isolé »).

- Grâce à une campagne de forage d'une vingtaine de piézomètres, un *suivi piézométrique* a été réalisé afin de caractériser l'hydrogéologie du plateau du Gerny. Chacun de ces ouvrages a fait l'objet d'un essai de pompage de courte durée de manière à quantifier la conductivité hydraulique et la transmissivité locales.

Le niveau de la nappe souterraine est, de manière générale, plus élevé dans la Formation de Fromelennes qu'au sein du Membre de l'Arche démontrant que les shales de la Formation de Nismes jouent bien un rôle de limite hydrogéologique. Un décrochement piézométrique important est d'ailleurs observé entre les calcaires frasniens et les calcaires givetiens (jusqu'à 53,47 mètres en période de hautes eaux) ; il en est de même entre les deux lentilles calcaires séparées par les schistes frasniens, mais de manière moins marquée (*Figure VII.4*).

Par ailleurs, les eaux souterraines contenues dans la Formation de Neuville sont drainées vers le ruisseau du Biran, qui constitue le niveau de base. Les niveaux piézométriques enregistrés sont inférieurs d'au moins 30 m à la cote de la source de Tridaine, ce qui confirme l'absence de liaison hydraulique avec le Membre du Lion.

- Le *monitoring de la source de Tridaine* a été réalisé. En période d'étiage, le débit de la source peut descendre sous les 10 m³/h, tandis qu'en période de hautes eaux, il peut atteindre les 283 m³/h. Le dispositif mis en place capte un débit maximal de 60 m³/h, dont 7 m³/h sont destinés à l'alimentation de l'abbaye Saint-Rémy et constituent une des matières premières majeures pour produire de la bière (la Trappiste de Rochefort). Les 43 m³/h restants assurent l'alimentation en eau potable de l'agglomération de Rochefort (7000 abonnés).
- Les *essais de traçage* (EWTS 2011) ont permis entre autres de mettre en évidence les connexions hydrogéologiques entre les piézomètres de la carrière de la Boverie implantés au sein des lentilles calcaires de l'Arche et du Lion, et la source de Tridaine, et l'absence de relation directe, ou du moins rapide, entre la perte de l'Entre-deux-Falleux et la source de Tridaine.

Des essais de traçages ont démontré l'existence d'une communication hydraulique entre les deux lentilles de calcaire via le Membre de Bieumont, constitué de bancs calcaires argileux. En effet, la nappe d'eau souterraine contenue dans celle de l'Arche se déverse en permanence vers celle du Lion (décrochement piézométrique) (*Figure VII.5*). Les fluctuations saisonnières maximales atteignent 20 m dans la partie nord-est du Membre du Lion et 14 m dans la partie nord-est du Membre de l'Arche (*Figure VII.4*).

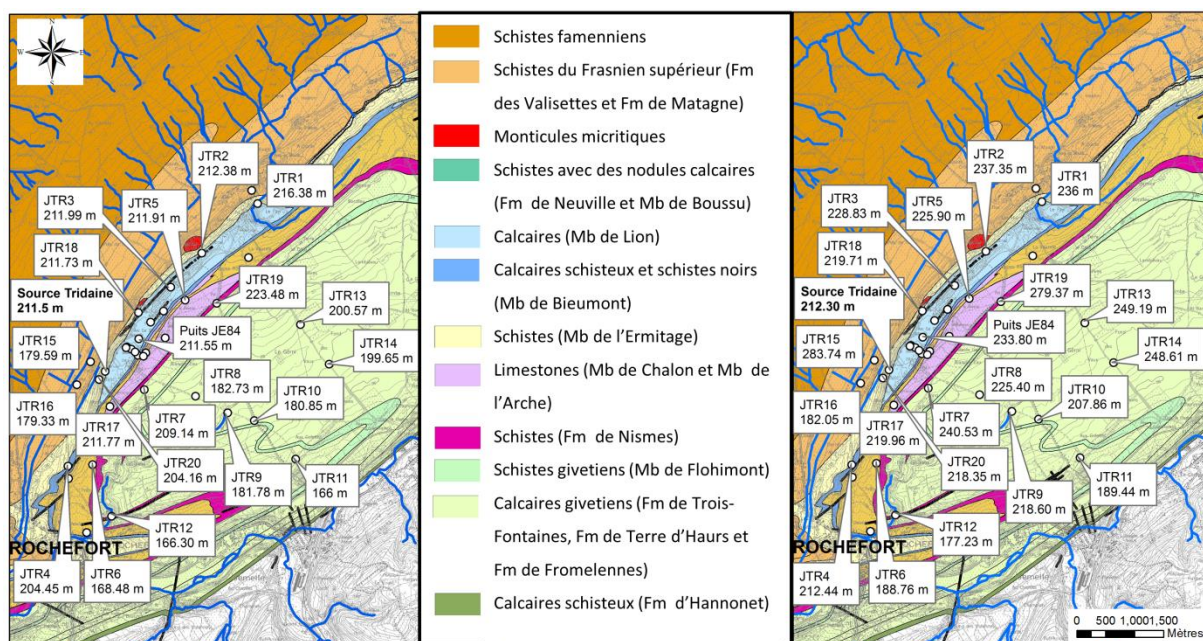


Figure VII.4 : Cartes piézométriques du plateau du Gerny en périodes de basses eaux (à gauche) et de hautes eaux (à droite) (Bonniver et al. 2012)

- Les *essais de pompage* ont mesuré une conductivité hydraulique générale inférieure à 10^{-6} m/s. Cependant, un axe plus perméable (conductivités hydrauliques pouvant excéder les 10^{-5} m/s) a été mis en évidence depuis la source de Tridaine en direction du nord-est, parallèlement aux failles longitudinales de Sainte-Anne et de la carrière de la Boverie.

Les essais de pompage et de traçage dans l'aquifère carbonaté ont permis de déceler qu'une quelconque pollution qui percolerait vers la nappe à partir de la fosse du Membre du Lion atteindrait l'exutoire endéans les 24 h, ce qui correspond au temps de transfert d'un traceur dans l'eau souterraine dans la zone de prévention rapprochée des captages (zone IIa).

- Plusieurs *campagnes d'échantillonnage* ont été réalisées pour établir une caractérisation physico-chimique et micro-biologique des eaux au niveau de la source de Tridaine, au puits de l'abbaye Saint-Rémy et dans les ouvrages implantés dans la carrière de la Boverie. Le faciès hydrochimique des lentilles calcaires a pu être déterminé à l'aide du diagramme de Piper (Piper 1944). Il est de type bicarbonaté calcique légèrement magnésien.

Les concentrations en ions nuisibles, tels que les nitrates, sont inférieures à 50 mg/l, norme de potabilité imposée par la Région wallonne²¹ (Moniteur belge 2004). La concentration moyenne en sulfates à la source de Tridaine est de l'ordre de 101 mg/l avec une concentration minimale de 55 mg/l et maximale de 142 mg/l (mesures de 2008 à 2011). La répartition spatiale des teneurs en sulfates semble indiquer que les eaux souterraines se chargent lors de leur déversement depuis la lentille de l'Arche vers la lentille du Lion, c'est-à-dire en traversant les niveaux de calcaires argileux des Membres de Bieumont et de la Boverie, riches en pyrite.

²¹ www.moniteur.be

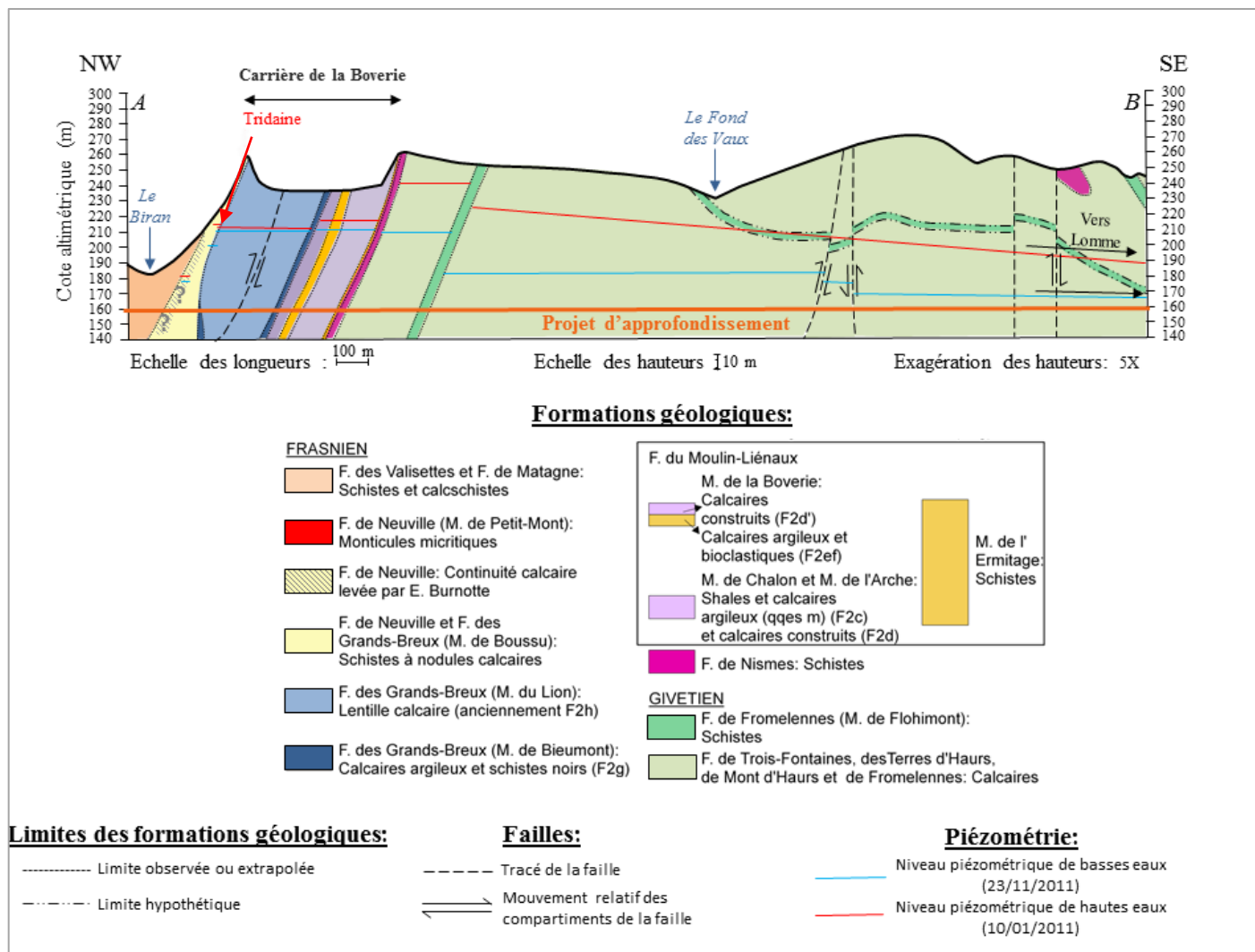


Figure VII.5 : Allure de la piézométrie en périodes de basses eaux (profil bleu, Novembre 2011) et de hautes eaux (profil rouge, Janvier 2011) dans le Plateau du Gern

- Une *modélisation des écoulements*, calibrée en régime permanent puis en régime transitoire, a été réalisée en collaboration avec le département ArGenCo de l'Université de Liège (Wildemeersch et al. 2012). À l'aide du logiciel SUFT3D (Saturated and Unsaturated Flow and Transport in 3D), deux modèles conceptuels (l'un régional, l'autre spécifique à l'unité aquifère de la Boverie) synthétisant la compréhension actuelle de l'hydrodynamisme du plateau du Gerny et de l'aquifère de la Boverie ont été définis (Figure VII.7). La réalisation du modèle a requis l'établissement de conditions frontières appropriées pour représenter l'échange de flux entre le système et les systèmes environnants. Ces conditions frontières sont déterminées par l'identification des structures hydrogéologiques et par le niveau piézométrique de la nappe souterraine et ses fluctuations.
- La modélisation en régime permanent a permis de quantifier les flux échangés entre les lentilles calcaires et les formations calcaires et argileuses limitrophes (Figure VII.6). Il en est ressorti que les flux sont faibles (inférieures à 3 m³/h) voire négligeables, à l'exception des flux latéraux échangés avec le Membre de Bieumont (12,6 m³/h). L'alimentation des lentilles se fait principalement via la recharge météorique (30,3 m³/h) et l'infiltration du ruisseau de l'Entre-deux-Falleux (39,5 m³/h). Ces résultats de modélisation confirment l'hypothèse, émise lors du calcul du bilan hydrogéologique de la source de Tridaine, selon laquelle les lentilles calcaires constituent un système hydrogéologique quasi-fermé.

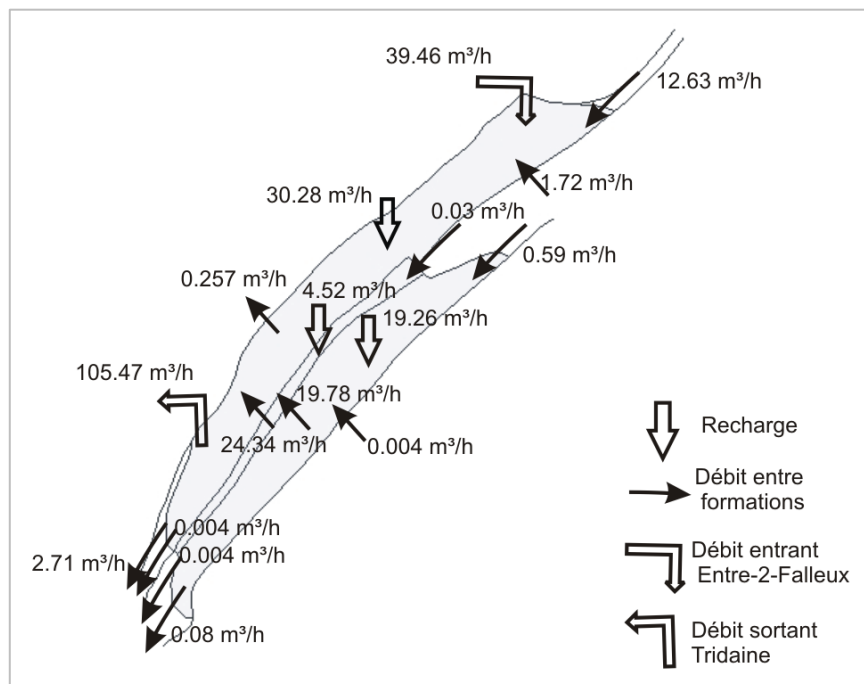


Figure VII.6 : Input, output et flux des eaux souterraines entre les lentilles calcaires et les formations géologiques limitrophes (Wildemeersch et al. 2012).

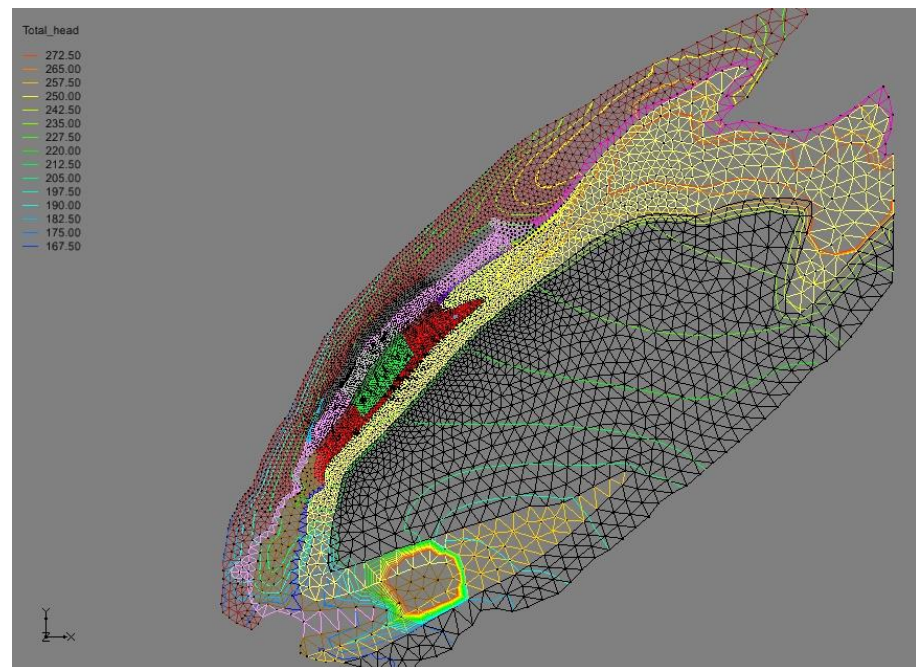
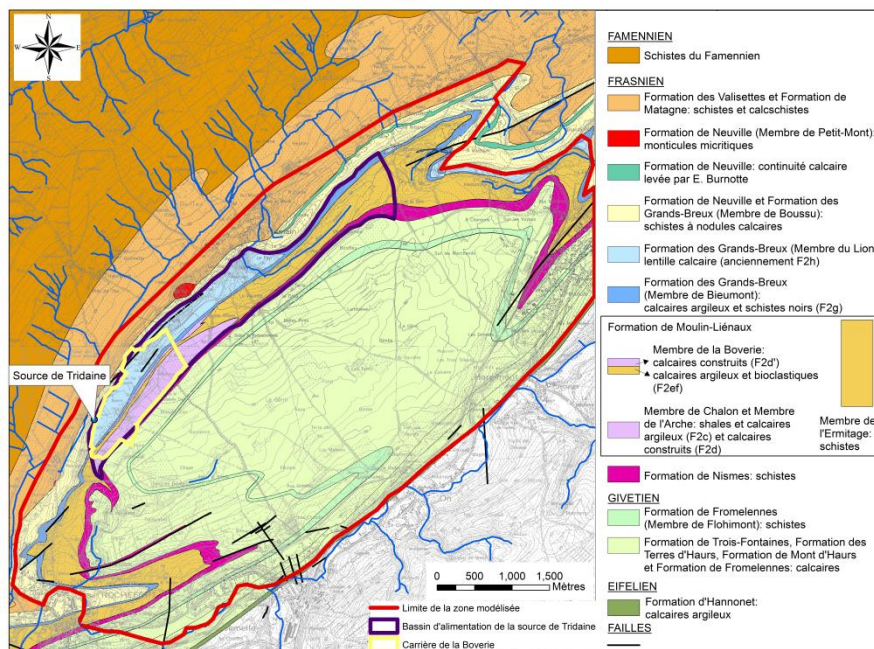


Figure VII.7 : Délimitation de la zone modélisée (à gauche) et discrétisation de la zone modélisée à l'échelle régionale (à droite) (Wildemeersch et al. 2012).

La modélisation en régime transitoire a permis d'obtenir par simulations les valeurs des débits d'eau souterraine à exhauser pour une exploitation d'une durée de 28 ans. Afin de rabattre la nappe 10 m sous le niveau du nouveau plancher d'exploitation, le groupe carrier Lhoist commencerait par pomper avec un débit de 160 m³/h pour ensuite le réduire à 117 m³/h trois mois plus tard et le maintenir (*Figure VII.8* et *Figure VII.9*). Un mois après le début du pompage, lorsque la nappe est suffisamment rabattue, l'approfondissement du premier palier serait entamé jusqu'à la cote de 205 m. Durant cette période, la nappe serait rabattue à une cote altimétrique moyenne de 180 m avec des fluctuations saisonnières variant entre 195 m (hautes eaux) et 170 m (basses eaux).

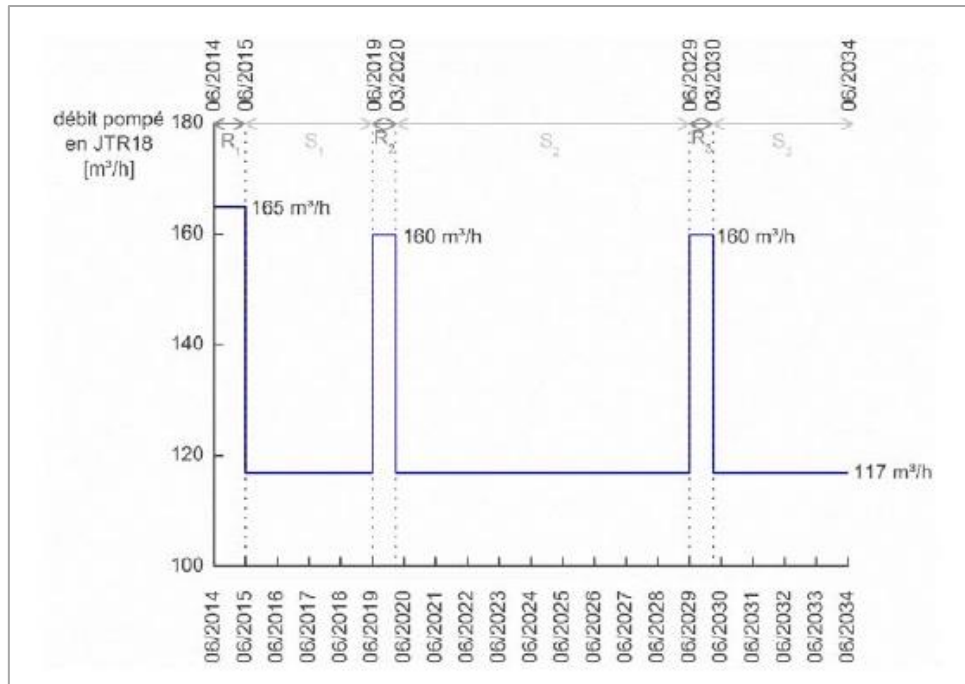


Figure VII.8 : Rabattement de la nappe sous la carrière (pompage de ± 160 m³/h) et stabilisation de son niveau pendant l'exploitation du chaque palier (pompage de l'ordre de 117 m³/h) (Wildemeersch et al. 2012).

Sept ans plus tard, seraient entrepris le second cycle de rabattement-stabilisation de la nappe souterraine et l'exploitation du deuxième palier, jusqu'à la cote de 190 m. Les débits pompés seraient alors de 165 m³/h et de 117 m³/h. Il en serait de même pour les troisième et quatrième cycles de rabattement-stabilisation, de sorte que la nappe souterraine soit rabattue sous la cote de 175 m et finalement 160 m.

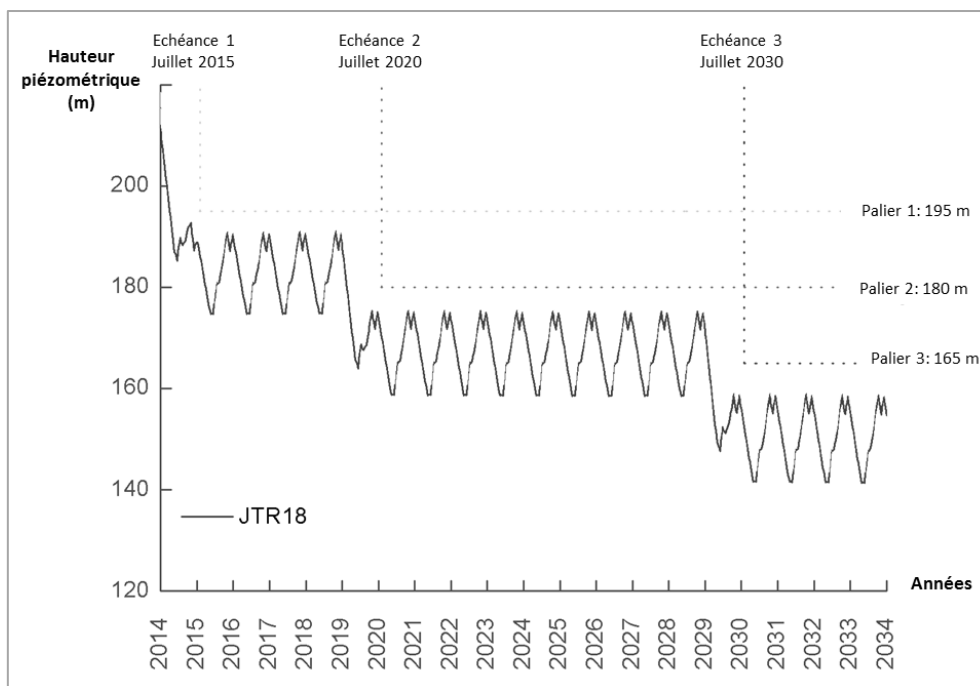


Figure VII.9 : Variations du niveau piézométrique de la nappe souterraine au niveau du puits JTR18 suite aux cycles de rabattement/stabilisation de la nappe souterraine par exhaure dans la carrière (Wildemeersch et al. 2012).

VII.1.6 Valorisation de l'étude hydrogéologique

Dans une perspective d'approfondissement de la carrière, une meilleure connaissance du contexte hydrogéologique acquise et la modélisation mathématique ont permis de constater que la mise en place d'exhaure dans la carrière, suite à son approfondissement (jusqu'à +160 m), modifierait la piézométrie globale de l'aquifère de la Boverie et entraînerait par conséquent le tarissement de la source Tridaine, mais permettrait de maintenir tout au long de l'année un pompage constant proche de 100 m³/h. La « surexploitation » de la nappe en période d'étiage serait compensée par une « sous-exploitation » de la nappe en période de recharge. Les eaux d'exhaure et les réserves d'eau seraient valorisées en permanence permettant, même en cas de période de sécheresse prolongée, de pallier l'absence d'alimentation en eau de l'abbaye Saint-Rémy et de la ville de Rochefort.

VII.1.7 Conclusion

L'indice d'interaction élevé obtenu pour la carrière de la Boverie suggère la réalisation d'une étude hydrogéologique approfondie de la zone d'étude. Lorsque celle-ci a été réalisée, elle a non seulement permis de comprendre l'hydrodynamisme des eaux souterraines de la nappe contenue dans les calcaires frasniens mais aussi, par simulation de l'approfondissement de la carrière par modélisation mathématique, d'appuyer la faisabilité d'exploiter la roche à sec en alimentant simultanément l'abbaye Saint-Rémy et la ville de Rochefort en eau potable, malgré le tarissement de la source de Tridaine.

VII.2 LA CARRIÈRE DE DOLOMIE DE MARCHE-LES-DAMES

VII.2.1 Introduction

La carrière de Marche-les-Dames, exploitée par le Groupe Lhoist, est le plus grand site d'exploitation de dolomie d'Europe. Elle s'étend au creux d'un méandre de la Meuse entre Marche-les-Dames, à l'ouest et Vezin, à l'est (*Figure VII.10*). La Meuse constitue le niveau de base régional dans lequel se jettent la Gelbressée et l'Haigneaux, à l'ouest et la Somme, à l'est. L'Haigneaux divise le site d'exploitation en deux parties : la carrière Dolomeuse, à l'ouest et la carrière de Wartet (I et II), à l'est.

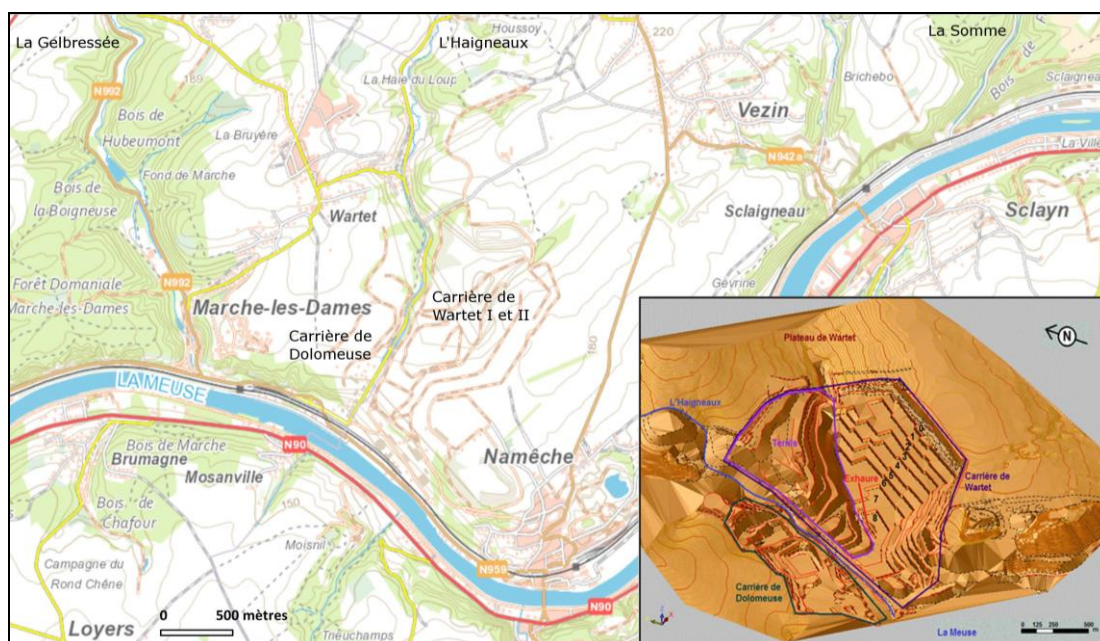


Figure VII.10 : Localisation du site d'exploitation de dolomie de Marche-les-Dames.

VII.2.2 Les paramètres de l'indice carrière

VII.2.2.1 Le contexte géologique

La carrière est ouverte dans l'unité des écaillles et massifs renversés de Haine-Sambre et Meuse (*Figure VII.11*), au sud de la Faille de Landenne (*Belanger et al. 2012*). La direction générale des couches est N270 à 290°E avec un pendage de 5 à 15° vers le sud-est.

Les formations géologiques observées au nord de la carrière sont des grès qui datent du Dévonien (Frasien-Famennien) ; celles observées au niveau du site sont des calcaires qui datent du Carbonifère (Tournaisien-Viséen). Il s'agit du plus jeune au plus ancien du calcaire des Formations de Lives et de la dolomie des Formations de Neffe, de Terwagne et de Namur (*de Dorlodot 1895*).

Les calcaires sont séparés des grès par la Formation schisteuse du Pont d'Arcole. La carrière est ainsi ouverte dans une formation dont l'extension est limitée au nord par une formation de faible conductivité hydraulique ; les écoulements souterrains sont limités au sud

par la Meuse et à l'ouest et à l'est par ses affluents. La superficie impactée est inférieure à 40 km². Dès lors, la carrière rentre dans la catégorie « **contexte extension locale** » et on lui attribue dans l'équation de l'indice d'interaction la valeur de 1 à G₃.

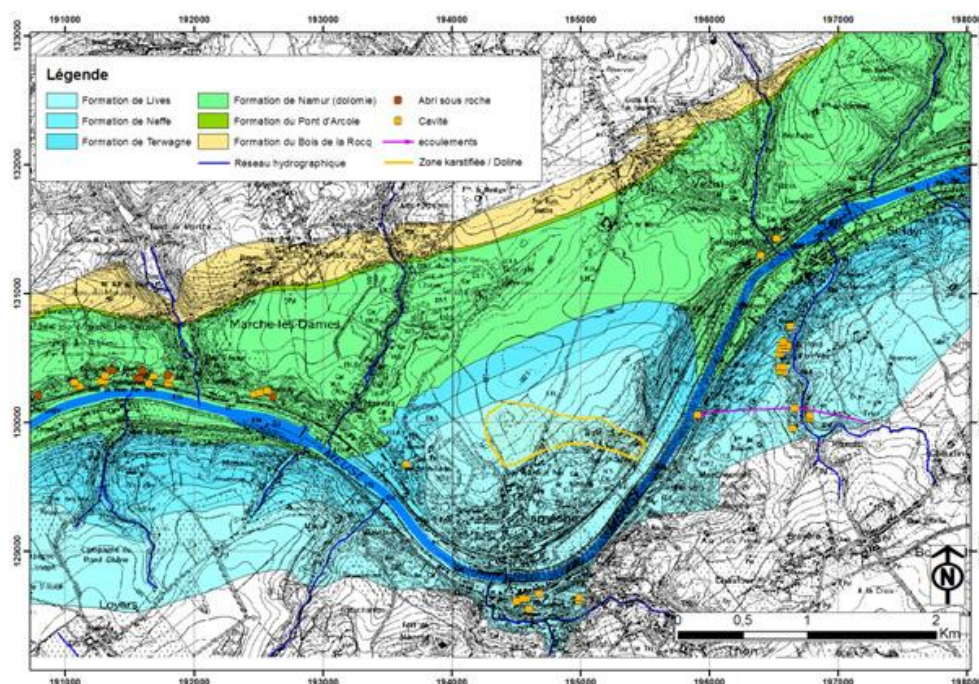


Figure VII.11 : Carte géologique de la zone d'étude (Passagez 2012).

VII.2.2.2 Le contexte hydrogéologique

Trois unités hydrogéologiques aquifères se distinguent (Figure VII.12).

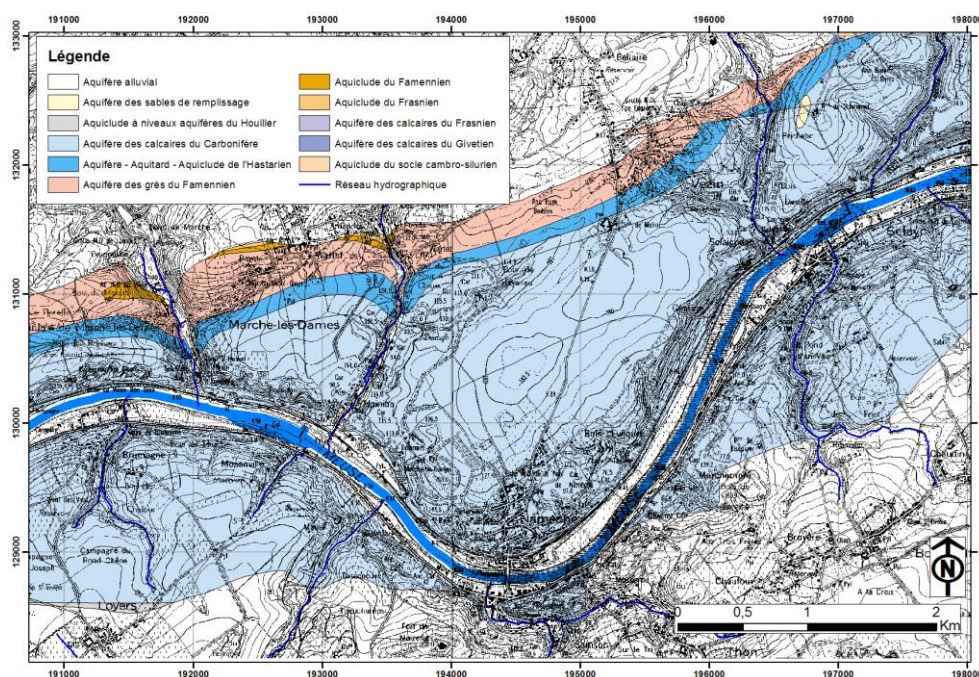


Figure VII.12 : Carte hydrogéologique de la zone d'étude (Passagez 2012).

- l'aquifère des calcaires carbonifères, drainé par la Meuse et intensément exploité par les compagnies d'eau dû à son important réseau de fissurations et de karstifications à l'échelle locale ;
- l'aquifère des grès du Famennien, probablement drainé par l'Haigneaux, la Gelbressée et la Somme ;
- l'aquifère alluvial de la Meuse, en étroite relation avec l'aquifère des calcaires carbonifères.

Les deux premières sont séparées par l'unité aquifère-aquitard-aquiclude du Tournaisien inférieur qui constitue une barrière hydrogéologique de par sa nature géologique (Formation schisteuse du Pont d'Arcole). Dès lors, la carrière rentre dans la catégorie « **contexte aquifère carbonaté** » et on attribue dans l'équation de l'indice d'interaction une valeur de 1 à H_4 dans le calcul de l'indice d'interaction.

Remarquons que dans la carrière de Dolomeuse, à l'ouest de la vallée très encaissée de l'Haigneaux, le phénomène de fantômisiation de la dolomie est important. Rappelons que la fantômisiation résulte d'une décohésion granulaire de la roche donnant un sable dolomitique, plus difficilement valorisable. Ce processus d'altération joue un rôle majeur en hydrogéologie en augmentant le coefficient d'emménagement spécifique et la conductivité hydraulique de la roche.

VII.2.2.3 Le contexte piézométrique

Il existe six piézomètres, dont cinq sont opérationnels (*Figure VII.13*), forés dans la carrière de Marche-les-Dames. Actuellement, la fosse la plus profonde est constituée de 9 étages de 15 m chacun. Le plancher inférieur s'étend à la cote +35 m, c'est-à-dire 40 m sous le niveau de la Meuse qui impose le niveau de base régional.

À partir du 6^{ème} étage, l'approfondissement de la carrière sous le niveau de la Meuse a donc nécessité la mise en place d'exhaure. Les eaux pompées sont directement retournées dans l'Haigneaux, dont la cote altimétrique est supérieure de 30 m à celle de la nappe rabattue des calcaires. Néanmoins, les stations de jaugeage mises en place en amont et en aval ont permis de démontrer l'absence d'infiltration du ruisseau vers la carrière suite à la faible conductivité hydraulique de son lit (*Figure VII.14*).

Les fluctuations piézométriques observées dans le piézomètre Pz9, situé à la confluence de l'Haigneaux et de la Meuse, sont en lien avec les variations de hauteur de la Meuse et non avec le cône de rabattement de la nappe des calcaires carbonifères. Cette observation démontre que malgré une infiltration partielle en rive gauche de la Meuse dû à l'écoulement de la nappe vers le nord, c'est-à-dire en direction du pompage d'exhaure, celle-ci demeure un potentiel imposé (*Figure VII.15*). Dès lors, la carrière rentre dans la catégorie « **P = N < T (=NB)** » et on lui attribue dans l'équation de l'indice d'interaction une valeur de 1 à P_3 dans le calcul de l'indice d'interaction.

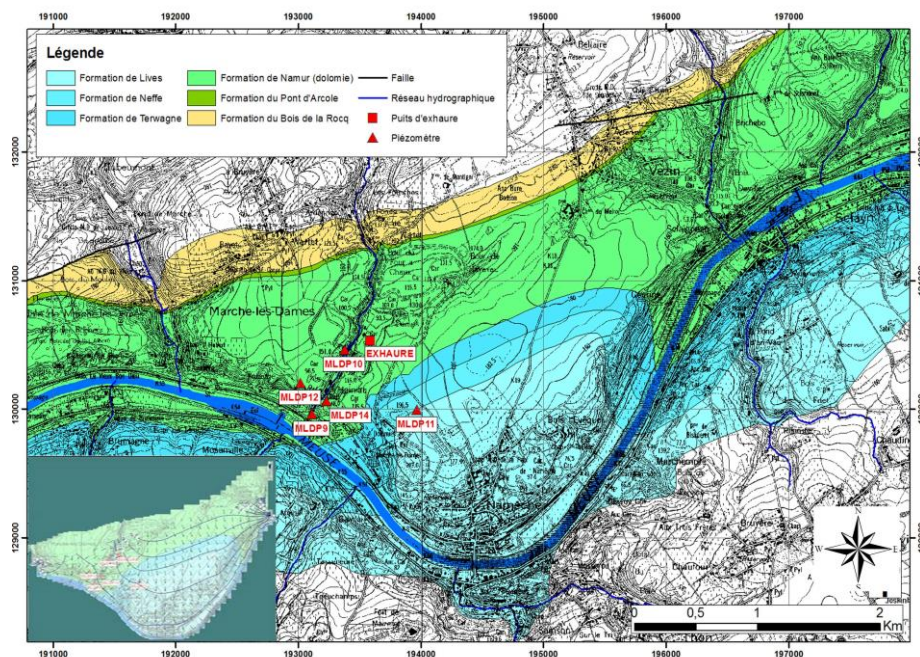


Figure VII.13 : Localisation des piézomètres et allure de la piézométrie en situation naturelle, c'est-à-dire en absence d'exhaure. (Passagez 2012).

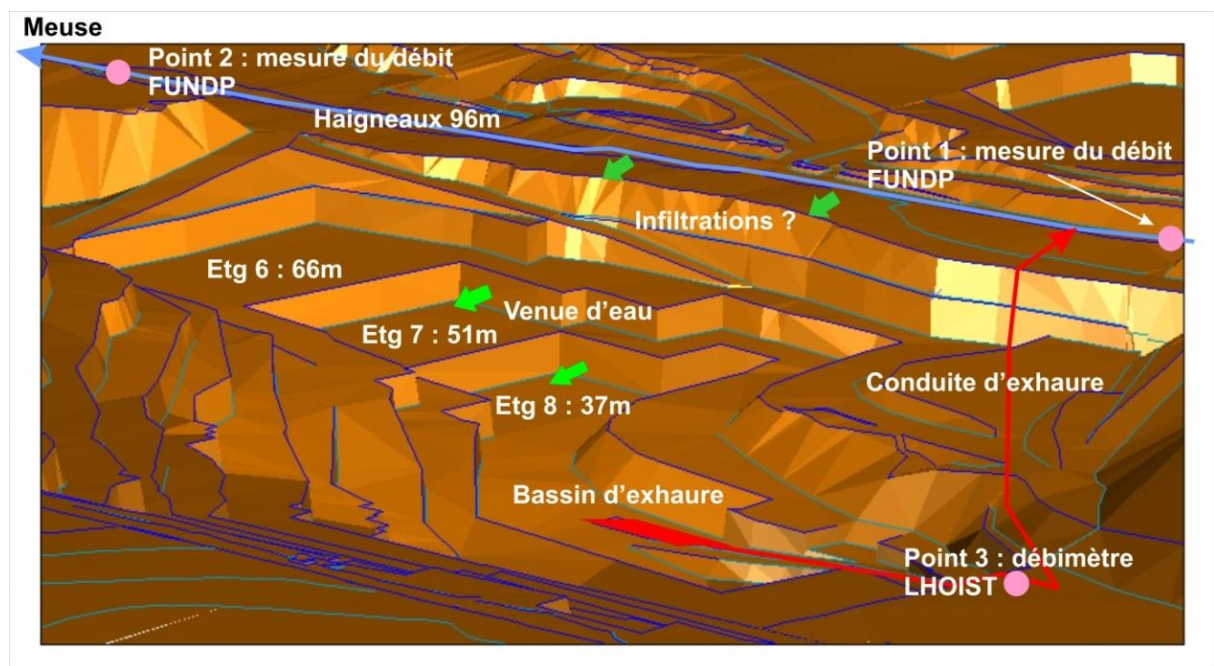


Figure VII.14 : Profil du site d'extraction avec les stations de jaugeage de l'Haigneaux (en rose) et le circuit des eaux exhaurées (en rouge) (com. pers. Lhoist 2012).

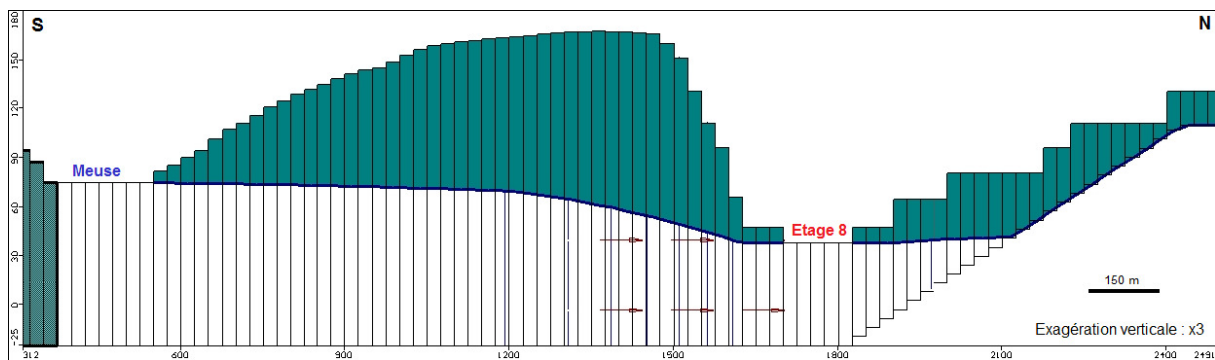


Figure VII.15 : Profil longitudinal Sud-Nord de la piézométrie dans la zone d'étude fin 2011 (Passagez 2012).

VII.2.2.4 Indice de l'indice carrière

En combinant les trois paramètres de l'indice carrière, un indice « very high » est obtenu (Tableau VII.4).

		Contexte géologique					
		Totalement isolé	Partiellement isolé	Extension locale	Extension régionale		
Contexte hydrogéologique	Aquifère carbonaté					$P = N < T (\neq NB)$	Contexte piézométrique
				X		$P = N < T (=NB)$	
						$P = N > T$	
						$P > N$	
	Aquifère					$P = N < T (\neq NB)$	
						$P = N < T (=NB)$	
						$P = N > T$	
						$P > N$	
	Aquitard					$P = N < T (\neq NB)$	
						$P = N < T (=NB)$	
						$P = N > T$	
						$P > N$	
	Aquiclude					$P = N < T (\neq NB)$	
						$P = N < T (=NB)$	
						$P = N > T$	
						$P > N$	

Tableau VII.4 : Indice de l'indice carrière pour la carrière de Marche-les-Dames (x).

VII.2.3 Les paramètres de l'indice masse d'eau souterraine

VII.2.3.1 La position relative de la carrière et des captages

La carrière de Marche-les-Dames est ouverte dans les calcaires tournaisiens et viséens, dont la nappe aquifère s'écoule vers le sud, en direction de la Meuse. Aucun captage n'est implanté dans l'aquifère calcaire ni dans l'aquifère alluvial avec lequel il est en liaison en aval. Dès lors, la carrière rentre dans la catégorie « **contexte hors zone d'alimentation** » et on lui attribue une valeur de 1 à C_1 dans l'équation de l'indice d'interaction.

VII.2.3.2 La production des captages

L'eau souterraine de l'aquifère des calcaires carbonifères n'est pas exploitée pour la production d'eau potable (mais bien par quelques puits privés) dans les environs de la carrière de Marche-les-Dames. Dès lors, la carrière rentre dans la catégorie « **production inférieure à 2 m³/h** » et on lui attribue une valeur de 1 à T₁ dans l'équation de l'indice d'interaction.

VII.2.3.3 Le potentiel qualitatif de l'eau souterraine

Des pesticides, des sulfates, des chlorures, des nitrites, des nitrates, etc. ont été détectés dans les échantillons d'eau d'exhaure de la carrière. Les nitrates non assimilés par la végétation, très solubles dans l'eau, sont entraînés par la pluie et contaminent alors les eaux de surface par ruissellement et les eaux souterraines par infiltration. Le risque est plus important pour les nappes peu profondes telles que les nappes alluviales.

En absence de contamination anthropique, la teneur naturelle en nitrates est de l'ordre de 0,1 à 1 mg/l. Dans le piézomètre Marche-les-Dames P1 (X: 190690, Y: 130080), foré dans les alluvions et graviers de la Meuse vers Beez, la concentration moyenne en nitrates est de 6 mg/l (données de 1994 à 2013) (*com. pers. Delvaux 2015*), celle de l'eau d'exhaure est de 4 mg/l (en 2015) (*com. pers. De Mot 2015*) et celle de l'eau de la Meuse, échantillonnée entre Namur et Andenne, est de 3 mg/l. On observe donc une influence de dilution de la concentration en nitrates de l'aquifère alluvial de la Meuse sur l'aquifère des calcaires carbonifères avec lequel il est en liaison hydraulique.

Il est considéré dans le calcul de l'indice d'interaction que l'eau souterraine est potabilisable sans être toutefois de bonne qualité, suite à la forte infiltration des eaux de la Meuse. On lui attribue donc une valeur de 2 à L₂ dans l'équation de l'indice d'interaction.

VII.2.3.4 Indice masse d'eau souterraine

En combinant les trois paramètres de l'indice masse d'eau souterraine, un indice « low » est obtenu (*Tableau VII.5*).

		Potentiel qualitatif de l'eau souterraine					
		Inapte à la production	Eau potabilisable	De bonne qualité	De qualité exceptionnelle		
Productivité de la formation hydrogéologique	> 30 m³/h					Zone IIa	Position relative du site et des captages
						Zone IIb	
						Alimentation	
						Hors zone	
	10 - 30 m³/h					Zone IIa	
						Zone IIb	
						Alimentation	
						Hors zone	
	2 - 10 m³/h					Zone IIa	
						Zone IIb	
						Alimentation	
						Hors zone	
	< 2 m³/h					Zone IIa	
						Zone IIb	
						Alimentation	
						Hors zone	

Tableau VII.5 : Indice masse d'eau souterraine pour la carrière de Marche-les-Dames (x).

VII.2.4 L'indice d'interaction

En combinant les paramètres de l'indice carrière et de l'indice masse d'eau souterraine dans les équations de l'indice d'interaction pour la carrière de Marche-les-Dames, on obtient les résultats suivants :

$$L = 0$$

$$M = -9.30 + 0 * 0 - 0.05 * 0 + 2.96 * 0 + 2.96 * 1 + 0 * 0 + 2.24 * 0 + 4.72 * 1 + 4.61 * 0 + 0 * 0 - 0.62 * 0 - 0.64 * 1 - 0.68 * 0 + 0 * 1 + 3.29 * 0 + 5.40 * 0 + 5.40 * 0 + 0 * 1 + 0.46 * 0 + 1.72 * 0 + 4.55 * 0 + 0 * 0 + 4.12 * 1 + 4.68 * 0 + 4.83 * 0 = 1.86$$

$$H = -2.09 + 0.82 * 0 - 0 * 0 + 5.15 * 0 + 5.15 * 1 - 5.36 * 0 + 0 * 0 + 3.93 * 1 + 3.82 * 0 + 0.5 * 0 + 0 * 0 - 0.02 * 1 - 0.03 * 0 - 6.94 * 1 + 0 * 0 + 5 * 0 + 5.36 * 0 - 3.57 * 1 + 0 * 0 + 2.98 * 0 + 6.5 * 0 - 7.23 * 0 + 0 * 1 + 1.92 * 0 + 3.24 * 0 = -3.54$$

$$VH = 24.6 - 7.45 * 0 - 9.13 * 0 + 0 * 0 + 0 * 1 - 17.2 * 0 - 7.89 * 0 + 0 * 1 - 0.11 * 0 - 0.49 * 0 + 0.02 * 0 + 0 * 1 + 0.04 * 0 - 23.9 * 1 - 8.62 * 0 + 0 * 0 + 0.788 * 0 - 13.2 * 1 - 6.28 * 0 + 0 * 0 + 2.52 * 0 - 14.1 * 0 - 3.73 * 1 + 0 * 0 + 3.36 * 0 = -16.23$$

Ceux-ci sont ensuite insérés dans les équations de probabilités. L'équation dont la probabilité est la plus élevée attribue son indice d'interaction au site carrier.

$$P(L) = \frac{e^0}{e^0 + e^{1.86} + e^{-3.54} + e^{-16.23}} = 0.13$$

$$P(M) = \frac{e^{7.67}}{e^0 + e^{1.86} + e^{-3.54} + e^{-16.23}} = 0.86$$

$$P(H) = \frac{e^{8.8}}{e^0 + e^{1.86} + e^{-3.54} + e^{-16.23}} = 0$$

$$P(VH) = \frac{e^{10.728}}{e^0 + e^{1.86} + e^{-3.54} + e^{-16.23}} = 0$$

On en conclut que l'indice d'interaction est « medium ». Il est donc conseillé à l'exploitant de réaliser une contextualisation géologique et hydrogéologique ainsi qu'un suivi piézométrique de la nappe d'eau souterraine concernée par l'exploitation.

À l'heure actuelle, le groupe Lhoist a mené l'investigation au-delà de ce qu'il est recommandé par l'indice d'interaction en réalisant une modélisation mathématique. En effet, une étude dont les buts principaux étaient de synthétiser les données hydrogéologiques existantes et de simuler par modélisation mathématique les conditions d'exhaure en fonction des divers scénarios d'extension et d'approfondissement de la carrière de Marche-les-Dames, a été réalisée à l'Université de Namur (*Passagez 2012*).

VII.2.5 Investigations réalisées

Dans le cadre du projet d'extension et d'approfondissement, le groupe Lhoist a lancé une étude hydrogéologique détaillée de la région (*Deryck 1990 ; Passagez 2012*).

- Un *levé géologique* a permis de caractériser les dolomies et de localiser les schistes de la Formation du Pont d'Arcole qui compartimente au nord les grès famenniens et les calcaires carbonifères au sud (*Passagez 2012*).
- Des *bilans hydrogéologiques* ont été réalisés à l'échelle annuelle (*Passagez 2012*). Les débits de la Meuse et de ses affluents n'étant pas connus, ils n'ont dès lors pas été pris en compte dans les équations.

Le bilan hydrogéologique pour la période de janvier 2000 à décembre 2011 :

- Lorsque l'ensemble du site est considéré, c'est-à-dire avec une couverture végétale, on prend en compte la RFU : $P - ETR = EU$

$$799.35mm - 624.53mm = 174.82mm$$

- Lorsque seule la carrière, c'est-à-dire sans couverture végétale, est considérée, il n'y a dès lors pas de RFU : $P - ETR = PE$

$$799.35mm - 536.53mm = 262.82mm$$

- RFU : la réserve facilement utilisable ;
- P : les précipitations ;
- ETR : l'évapotranspiration réelle ;
- EU : l'eau utile ;
- PE : les précipitations efficaces.

Grâce à une campagne de forage de cinq piézomètres, un *suivi piézométrique* a été réalisé afin de caractériser l'hydrogéologie de la zone d'étude. Il permet d'observer le changement notable de la piézométrie provoqué par l'exhaure dans la carrière. Cette exhaure reprend une quantité importante de l'écoulement des eaux souterraines initialement drainées par la Meuse.

- Le *monitoring du volume d'exhaure* indique que ce dernier n'a cessé d'augmenter de 1999

(120 m³/h) à 2011 (690 m³/h). Cette augmentation résulte d'une part, de l'approfondissement de la carrière, et d'autre part, de son extension vers la Meuse. En observant l'évolution de ces débits en fonction du temps, on remarque que l'extension de la carrière semble influencer plus fortement le volume d'exhaure que son approfondissement (*Figure VII.16*).

- Les *essais de traçage* n'ont pas été concluants. La modélisation des écoulements a montré que les quantités de traceurs injectées (150 g de fluorescéine, 50 g de rhodamine) étaient largement insuffisantes et que les traceurs arrivaient au puisard à une concentration sous le seuil de détection (*Passagez 2012*).
- Les *essais de pompage* réalisés au niveau du site ont permis de quantifier la conductivité hydraulique et la transmissivité locales de la roche. Ainsi, des zones de conductivités hydrauliques différentes se distinguent : les calcaires sont plus perméables ($3,5 \cdot 10^{-5}$ m/s) que les dolomies ($9 \cdot 10^{-6}$ m/s), parfois altérées par fantômisation.

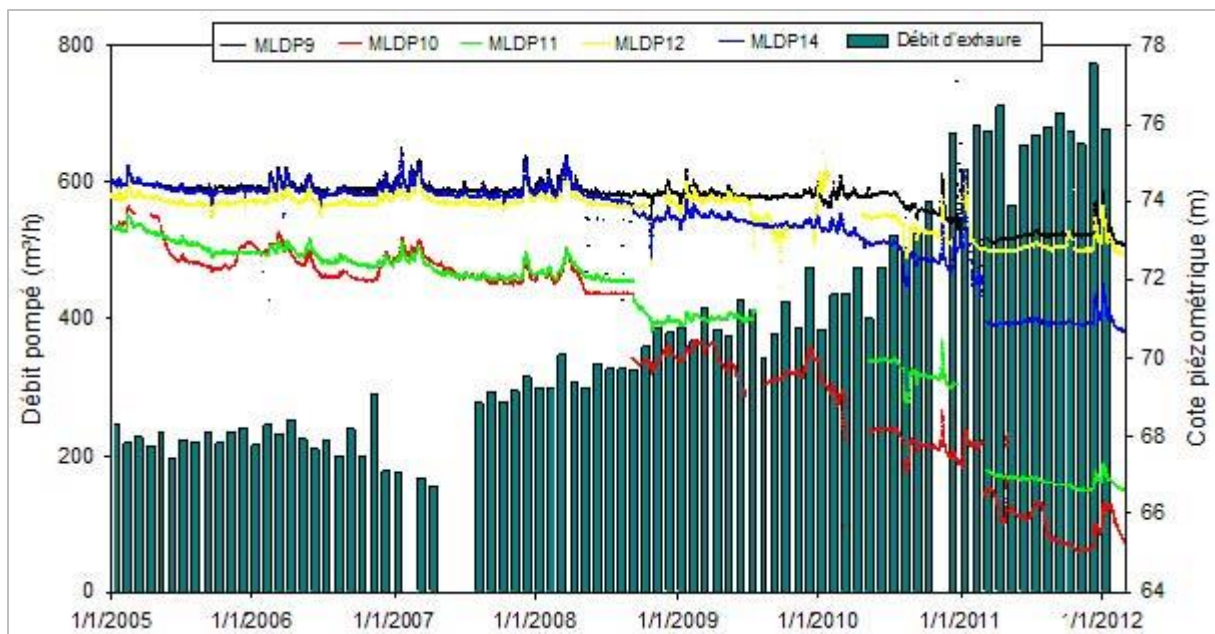


Figure VII.16 : Évolution des débits d'exhaure mensuels et des fluctuations piézométriques au droit de cinq piézomètres situés en périphérie du site d'extraction.

- Des *campagnes d'échantillonnage* sont régulièrement réalisées pour contrôler la qualité physico-chimique et micro-biologique des eaux au niveau du site carrier et du réseau hydrographique environnant. On note une nette influence des eaux de la Meuse dans les analyses, confirmant la liaison hydraulique entre les deux aquifères.
- Une *modélisation des écoulements*, calibrée en régime permanent a été réalisée à l'aide du logiciel Visual Modflow (*Passagez 2012*). Un modèle conceptuel a été mis en place en vue de cerner l'impact de l'exploitation sur l'hydrogéologie locale et d'en prévoir l'évolution en fonction de l'extension et l'approfondissement de la carrière. La zone modélisée couvre une surface s'étendant d'ouest en est : du ruisseau de Gelbressée au ruisseau de Somme, et du sud au nord : de la Meuse à la Formation du Pont d'Arcole (*Figure VII.17*).

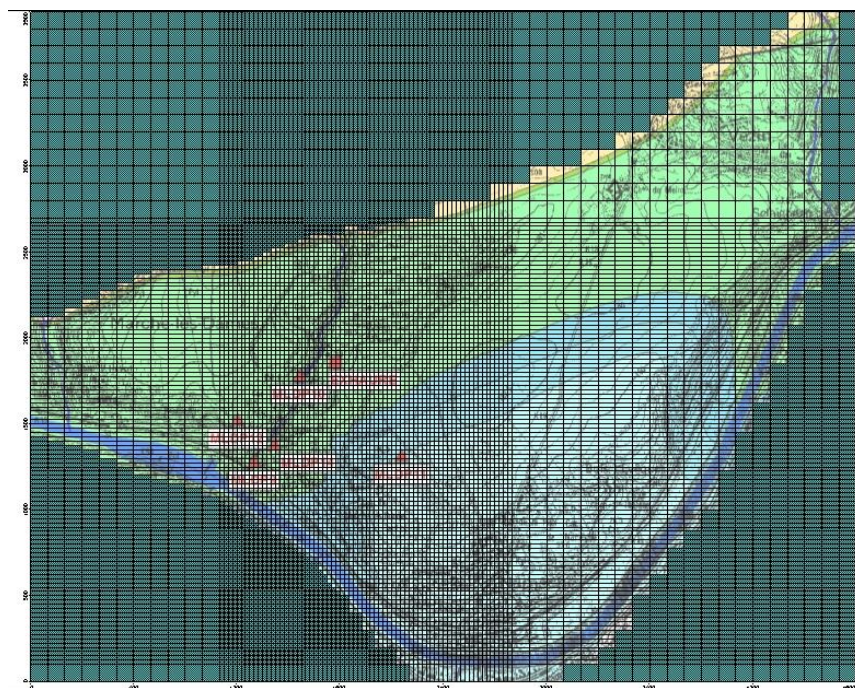


Figure VII.17 : Etendue de la zone modélisée.

Diverses simulations ont été réalisées dans le but de démontrer la viabilité de l'exploitation. Il en est ressorti que d'ici 2016, le débit de l'eau souterraine exploité n'augmenterait que de 3% (de 690 en 2011 à 710 m³/h) en poursuivant l'exploitation vers l'est, alors que l'extension de l'exploitation vers le sud engendrait, suite au rapprochement du front de la carrière de la rivière, des débits trop importants (770 m³/h) par rapport au débit maximal autorisé (750 m³/h). Dans les deux cas, l'eau exhaurée sur le site provient essentiellement de la Meuse (du sud-ouest) (Figure VII.18).

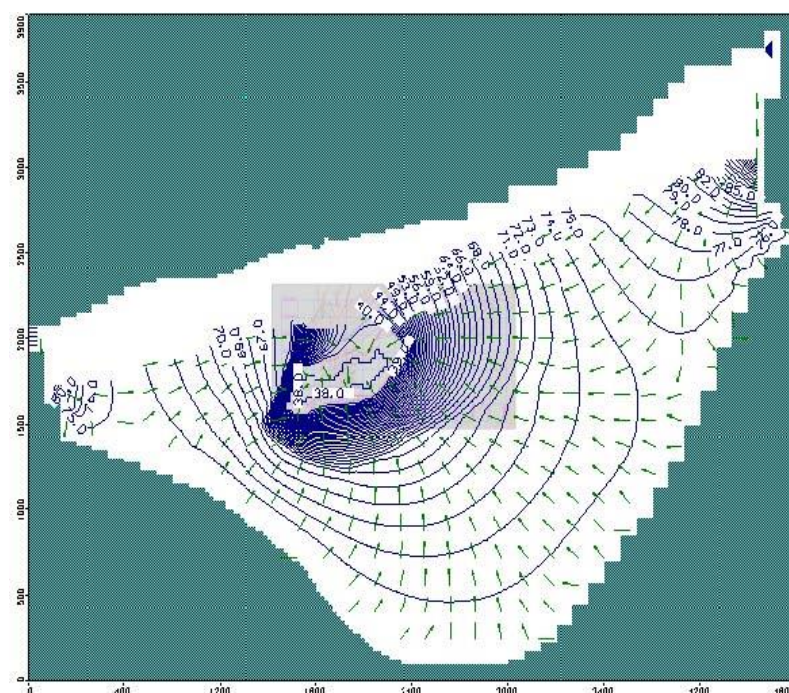


Figure VII.18 : Situation piézométrique simulée pour l'extension du site à l'horizon 2016.

VII.2.6 Valorisation de l'étude hydrogéologique

Dans une perspective d'approfondissement et d'extension de la carrière, une meilleure connaissance du contexte hydrogéologique acquise et la modélisation mathématique ont permis de mieux appréhender l'hydrodynamisme des eaux souterraines de l'aquifère des calcaires carbonifères et d'estimer l'augmentation des débits exhaurés ainsi que l'allure du cône de rabattement de la nappe souterraine. Ainsi, le groupe Lhoist s'est vu conseiller d'étendre l'extension de son site d'exploitation vers le nord-est et d'éviter de se rapprocher de la Meuse.

VII.2.7 Conclusion

L'indice d'interaction moyen obtenu pour la carrière de Marche-les-Dames a suggéré la réalisation d'une étude hydrogéologique ainsi qu'un suivi piézométrique de la zone d'étude, ce à quoi les carriers répondent déjà par le contrôle régulier de leur réseau de piézomètres.

Dans le cadre d'une problématique « interaction carrière/captage », on remarque que ces investigations suffisent, étant donné l'absence de captage pour la distribution publique à proximité de la carrière. Par contre, dans le cadre d'une problématique « exhaure », on constate qu'il a été judicieux de pousser l'étude plus loin en réalisant une modélisation mathématique en régime permanent. En effet, les simulations ont permis d'avoir une idée assez précise des volumes exhaurés et de l'étendue du cône de rabattement, indiquant ainsi clairement qu'une extension vers l'est est à préférer à une extension vers le sud. Effectivement, une extension en direction de la Meuse entraînerait l'infiltration de la rive gauche de celle-ci et l'eau de la nappe alluviale se retrouverait dans le pompage d'exhaure de la carrière, comme il a été confirmé en étudiant le chimisme de l'eau exhaurée. Le suivi d'un piézomètre localisé en bord de Meuse a permis de déceler que celle-ci constituait un potentiel imposé.

On constate qu'en absence d'ouvrage d'eau pour appréhender la piézométrie de part et d'autre d'un cours d'eau, il n'est pas aisé de déterminer si celui-ci constitue ou non un potentiel imposé et par conséquent si la carrière rentre dans la catégorie « $P = N < T (=NB)$ » ou « $P = N < T (\neq NB)$ ».

VIII CONCLUSIONS

En dépit de sa superficie limitée, la Wallonie possède un riche sous-sol de par ses ressources minérales et ses eaux souterraines. Les unes comme les autres sont intensément exploitées. La présente étude a montré que les roches les plus prisées par l'industrie (les roches carbonatées) sont celles qui détiennent les meilleures conductivités hydrauliques et capacités d'emmagasinement d'eau. Dès lors, une interaction peut se manifester au niveau des sites carriers et des captages pour la distribution publique d'eau potable situés à proximité de ceux-ci. En effet, le carrier désirant approfondir son site doit en assécher le fond de fosse en réalisant de l'exhaure, ce qui perturbe la piézométrie locale. Dans ce cadre, une « charte de concertation » élaborée par le SPW a été mise en place début des années 2010 entre Aquawal et la Fediex, afin de veiller au respect des deux activités et dans le but d'encourager une synergie entre elles.

La première partie du travail réalisé dans le cadre de cette thèse a consisté à établir des fiches descriptives reprenant les caractéristiques hydrogéologiques de l'environnement de chacun des 160 sites carriers wallons en activité. La conclusion rédigée pour chacune des carrières s'est cependant avérée assez fastidieuse à interpréter.

Dès lors, la deuxième partie du travail a consisté en la création d'un outil synthétisant l'information à partir de paramètres hydrogéologiques pertinents, afin d'illustrer l'interaction entre l'activité extractive et l'exploitation des eaux souterraines. La combinaison de ces paramètres fournira un indice capable d'aider les preneurs de décision quant au degré d'investigation de l'étude d'incidence nécessaire pour l'exploitation d'un site carrier.

Six paramètres ont ainsi été choisis. Trois paramètres définissent la carrière : le contexte hydrogéologique, le contexte géologique et le contexte piézométrique, et trois autres définissent la masse d'eau souterraine : la production des captages, le potentiel qualitatif de l'eau souterraine et la position relative du site carrier et des captages pour la distribution publique d'eau potable. Chaque paramètre est divisé en quatre catégories dont la combinaison détermine le degré de l'indice d'interaction. Celui-ci peut être faible, moyen, fort ou très fort.

Pour obtenir cet indice, nous avons estimé le degré d'interaction (faible, moyen, fort ou très fort) pour l'ensemble des 3227 combinaisons théoriques possibles des paramètres. Ces données ont ensuite été traitées à l'aide de deux méthodes : les choix discrets et le réseau de neurones artificiels, dans le but de combiner et de ponctuer les six paramètres. Les résultats des deux méthodes concordent pour plus de quatre carrières sur cinq.

La méthode des choix discrets fournit des probabilités qu'une carrière étudiée corresponde à chacun des quatre degrés d'interaction. La méthode du réseau de neurones artificiels fournit une réponse unique. Précisons que cet indice ne fournit qu'un outil d'évaluation relative. Il n'a pas été établi pour donner des réponses absolues, ni pour estimer la faisabilité de l'extension ou de l'approfondissement d'un site carrier. Dès lors, la méthode des choix discrets a été préférée dans le cadre de cette étude. La qualité du modèle établi est élevée ; son pouvoir de prédiction est de l'ordre de 62%.

Un des points forts de la méthodologie ainsi établie est qu'elle permet de réactualiser très facilement l'indice d'interaction en cas de modification d'un paramètre au cours du temps.

Ensuite, à chacun des quatre indices d'interaction (faible, moyen, fort ou très fort) ont été associées des classes d'investigations qu'il est conseillé de mettre en place dans le cadre de l'étude d'incidence d'une carrière. Ces classes sont les suivantes, chacune incluant les investigations précédentes :

- contextualisation hydrogéologique (indice d'interaction faible) ;
- suivi piézométrique (indice d'interaction moyen) ;
- modélisation mathématique en régime permanent (indice d'interaction élevé) ;
- modélisation mathématique en régime transitoire (indice d'interaction très élevé).

Après, nous avons procédé à la validation des paramètres de l'indice d'interaction et de l'échelle des investigations. D'une part, une modélisation, à l'aide du logiciel Visual Modflow, a permis une approche quantitative des paramètres. Une série de scénarios d'exploitation d'un site carrier ouvert à proximité d'un cours d'eau ont été simulés en modifiant les paramètres hydrogéologiques. Les résultats obtenus pour la piézométrie, la variation des débits exhaurés et la variation du débit de la rivière nous ont confortés dans nos choix.

D'autre part, l'indice d'interaction a été mis à l'épreuve en soumettant à une trentaine de géologues issus de différents secteurs (producteurs d'eau, géologues du SPW, géologues de bureaux d'étude, chercheurs universitaires et carriers), une série de carrières théoriques. Les sondés ont attribué à chaque carrière un des quatre indices d'interaction. Il s'est avéré que l'indice moyen des participants concorde dans 62% à 88% des cas avec l'indice obtenu avec notre modèle. Dans la majorité des cas restant, le degré d'investigations recommandé par notre indice d'interaction est plus élevé.

Finalement, une approche descriptive à partir de cas concrets de carrières wallonnes a permis d'illustrer l'outil. La comparaison entre l'étude d'incidence qui a été entreprise dans la réalité pour chacune de ces carrières et les investigations suggérées par les indices d'interaction obtenus a donné entière satisfaction.

En conclusion, l'application de l'indice d'interaction devrait constituer la première étape à réaliser lorsque l'exploitation d'une carrière est entamée ou lorsque la compagnie prévoit d'approfondir ou d'étendre la fosse d'extraction. Cette étape servirait de base à l'étude de faisabilité pré-requise à toute exploitation de carrière. Celle-ci constitue une étude rapide et de faibles coûts résumant la problématique. Elle expose le contexte hydrogéologique, les enjeux, les débits pompés, la qualité de l'eau souterraine et suggère le niveau d'investigations nécessaire. L'étude de faisabilité ensuite réalisée déterminera si le projet est techniquement envisageable.

IX PERSPECTIVES

Il existe diverses perspectives à notre étude. En effet, celle-ci pourrait être approfondie en étendant le domaine d'étude et/ou être enrichie en englobant d'autres aspects.

- Seuls les impacts directs de l'exhaure sur les ressources en eau souterraine ont été pris en compte dans notre étude. L'indice pourrait englober les **impacts indirects**, tels que les impacts morphologiques et géotectoniques, notamment en zone urbaine, qui peuvent se manifester par tassement ou par subsidence en cas de rabattement important et prolongé de la nappe. Ils peuvent exercer un impact à grande échelle sur l'environnement, voire même sur le milieu urbain.
- L'indice d'interaction est axé sur l'exploitation des eaux souterraines. Un **indice** similaire pourrait être créé **pour les ressources en eau souterraine** de manière générale. Les paramètres de la carrière définis demeureraient les mêmes, tandis que les paramètres de la masse d'eau souterraine varieraient. Le paramètre de qualité des eaux souterraines serait conservé et d'autres, tels que le drainage/l'infiltration du réseau hydrographique, la recharge de la formation hydrogéologique, etc. seraient définis.
- Notre méthode s'est volontairement limitée aux paramètres hydrogéologiques et géologiques. Il conviendrait de tenir compte des possibilités de **valorisation des eaux d'exhaure**, notamment pour la distribution publique d'eau potable ou pour le soutien du débit d'étiage des cours d'eau voisins.
- Il existe **quatre enjeux primordiaux** potentiellement affectés par l'activité extractive de la roche (*BRGM 2008*) :
 - l'alimentation en eau potable ;
 - la qualité des eaux souterraines ;
 - l'écologie ;
 - le paysage.

Les deux premiers enjeux et leur interaction avec l'activité extractive ont constitué le centre d'intérêt de la présente étude. En effet, l'aspect quantitatif et l'aspect qualitatif des ressources en eau souterraine ont largement été abordés dans le cadre de l'interaction entre les captages pour la distribution publique d'eau potable et l'activité extractive. Par contre, les autres enjeux impactés par l'activité extractive mériteraient que l'on se penche également dessus.

L'écologie a pour objet les relations des êtres vivants (les animaux, les végétaux, les micro-organismes, etc.) avec leur habitat et l'environnement. Le pompage des eaux souterraines, aussi bien au niveau des captages pour la production d'eau potable qu'au niveau des dispositifs d'exhaure au niveau des sites carriers, peut entraîner une destruction partielle ou totale de milieux sensibles comme l'assèchement de zones humides, la perturbation du débit du réseau hydrographique, la modification des conditions d'humidité des sols, la désaturation des réseaux karstiques, etc. Ces milieux sont entre autres repris parmi

les sites naturels du réseau de Natura 2000, dont l'objectif est de maintenir la diversité biologique des milieux tout en tenant compte des exigences économiques, culturelles et régionales dans une logique de développement durable.

Les sites carriers s'intègrent dans un territoire environnant que l'on appelle **le paysage**. Une étude du contexte périphérique des sites carriers, comprenant entre autres le zonage biologique et la connexion à d'autres milieux naturels, permet d'évaluer leurs relations fonctionnelles (écotones, zone tampon, corridor biologique,...) avec la matrice éco-paysagère.

Ainsi, un nouvel indice plus global, axé sur l'interaction environnementale, pourrait être mis en place.

X BIBLIOGRAPHIE

AIB-Vinçotte Inter, Département environnement et sécurité, Juin 1998. Étude d'incidences sur l'environnement - Siège d'Aisemont s.a. Carmeuse (Fosse-la-Ville).

Aries consultants, Août 2008. Étude d'incidences sur le plan - Révision du plan de secteur de Namur (planche 47/4) sur la commune de Namur.

Aries Consultant, Janvier 2009. Étude d'incidences sur plan - Révision du plan de secteur de Philippe-Couvin (planches 58/1et 58/2), rapport final. Demandeur de l'étude : DGO4 SPW.

Belanger I., Delaby S., Delcambre B., Ghysel P., Hennebert M., Laloux M., Marion J.-M., Mottequin B., Pingot J.-L., 2012. *Redéfinition des unités structurales du front varisque utilisées dans le cadre de la nouvelle Carte géologique de Wallonie (Belgique)*. Geologica Belgica ISSN: 1374-8505.

Ben-Akiva, M. and Lerman, S.R., 1985. *Discrete choice analysis: theory and application to travel demand*. Vol. 9. MIT press. ISBN: 9780262022170, 412 pp.

Bertola, C., 2010. Mise à jour de *L'activité extractive en Wallonie. Situation actuelle et perspectives*. Ministère la Région wallonne, Direction Générale de l'Aménagement du Territoire, du Logement et du Patrimoine. D/2004/5322/30.

Bierlaire, M., 2003. BIOGEME : *A free package for the estimation of discrete choice models*. Swiss Transport Research Conference, number TRANSP-OR-CONF-2006-048.

Blayo, F. et Verleysen, M., 1996. *Les réseaux de neurones artificiels*. Presses universitaires de France, Que sais-je n°3042, 1^{ère} édition.

Bonniver, I. et Hallet, V., 2013. *Convention de recherche d'intérêt général et pluridisciplinaire relative à l'évaluation des ressources en eau souterraine de la Wallonie*. Rapport final. Département de Géologie de l'Université de Namur, Belgique. DGARNE.

Bonniver, I., Rekk, S., Hallet, V., 2013. *Carte hydrogéologique de Wallonie, planchettes Rochefort - Nassogne (59/3-4)*. Édition : Service publique de Wallonie, DGO3 (DGARNE), Belgique. Dépôt légal D/2013/12.796/4 - ISBN 978-2-8056-0126-2.

Bonniver I., Hallet, V., Meus Ph., Mai 2012. Étude de faisabilité : Caractérisation hydrogéologique du plateau calcaire du Gerny entre Rochefort, Humain et Jemelle en vue du projet d'approfondissement de la Carrière de la Boverie (Groupe Lhoist) sous le niveau actuel de la nappe d'eau souterraine. Département de Géologie, Université de Namur, Belgique.

Bouezmarni, M., Denne, P., Debbaut, V., 2006. *Carte hydrogéologique de Wallonie, planchettes Florenville - Izel (67/7-8)*. Édition : Service publique de Wallonie, DGO³ (DGARNE), Belgique. Dépôt légal 2007/12.796/3 - ISBN 978-2-8056-0056-2.

Boulvain, F., Demany, B., Coen-Aubert, M., 2005. *Frasnian carbonate buildups of Southern Belgium: The Arche and Lion Members interpreted as atolls*. Geologica Belgica ISSN: 1374-8505.

Brahy, V., Orban, P., Brouyère, S., 2006. *L'exploitation des ressources en eau souterraine*. Res Eau 1. En collaboration avec la DGRNE.

BRGM. *SEQ-EAU (Système d'Evaluation de la Qualité des Eaux)*. Convention 98-9001.

BRGM/RP-56126-FR, Janvier 2008. *Évaluation des impacts environnementaux des carrières*. Avancement des travaux, synthèse 2005-2007.

Brouyère, S., Orban, P., Ruthy, I. Rapport analytique 2006-2007 sur l'état de l'Environnement wallon. *L'état quantitatif et qualitatif des eaux souterraines en Région wallonne*. Département ArGEnCo, Faculté des sciences appliquée, Université de Liège.

Brouyère, S., Orban, P., Wildemeers, S., Couturier, J., Gardin, N., Dassargues, A., 2009. *The hybrid finite element mixing cell method : a new flexible method for modeling mine groundwater problems, mine water environment*, 28(2), pp. 102-114.

Brouyère, S., Dassargues, A., Gesels, J., Jamin, P., Leroy, M., Orban, P., Thomas, L., Rorive, A., Hallet, V., 2010. *Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en œuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région wallonne*. Projet Synclin'eau. Région wallonne, S.P.G.E., Aquapôle.

Bultynck, P., et Dejonghe, L., 2001. *Devonian lithostratigraphic units (Belgium)*. Geologica Belgica ISSN : 1374-8505.

Bureau Conseil en Géologie, 2008. Extension de la carrière. Prospection géophysique. Imagerie électrique. 9 p.

Bureau Conseil en Géologie, 2008. Extension de la carrière. Prospection géophysique. Imagerie électrique - T6. Lhoist industrie. Jemelle. 2 p.

Chaboteau, J., 2010. Extension des gisements de Dolomies de Merlemont, notice hydrogéologique (10/02/2010). Lhoist Europe de l'Ouest.

Chapuis, R.P., 1999. *Borehole Variable-Head Permeability Tests in Compacted Clay Liners and Covers*. Canadian Geotechnical Journal, 36(1), pp. 39-51.

Collier, L. et Hallet, V., Mars 2013. Rapport de l'étude : *Examen des interactions entre les ressources en eau et l'industrie extractive en Région wallonne*. SPW – DGO3, 2013.

Collier, L., Barthélemy, J., Carletti, T., Moriamé, M., Sartenar, A., Hallet, V., 2015. *Calculation of an interaction index between the extractive activity and groundwater resources*. European Geosciences Union General Assembly 2015, EGU. Division Energy, Resources & Environment, ERE. Energy Procedia. Science Direct. University of Namur, Department of Geology and department of Mathematics.

Collier, L., 2009. *Etude hydrogéologique de la carrière de la Boverie et caractérisation du plateau du Gerny (Rochefort – Belgique)*. Mémoire de fin d'études (Master - Université Libre de Bruxelles). 119 p.

COST Action 620, 2003. *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonates (karst aquifers)*. Final report, European Cooperation in the field of scientific and technical research, Publication Office.

Darcy, H., 1856. *Les fontaines publiques de la Ville de Dijon. Exposition et Application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau*. V. Dalmont, Paris.

Dassargues, A., 1990. *Modèles mathématiques en hydrogéologie et paramétrisation*. Annales de la Société Géologique de Belgique, 113(2), pp. 217-229.

Dassargues, A. et Walraevens, K., 2014. *Watervoerende lagen en grondwater in België/Aquifères et eaux souterraines en Belgique*. Gent: Academia Press, ISBN : 9789038223643, 455 p.

Dauphiné, A., 2003. *Risque et catastrophes : Observer, spatialiser, comprendre, gérer*. Collection UGéographie. Éditeur Colin, A. 283 p.

De Broyer, C., Thys, G., Fairon, J., Michel G., 2002. *Atlas du Karst Wallon, inventaire cartographique des sites karstiques et des rivières souterraines de Wallonie*. DGRNE - CWEPS asbl.

de Dorlodot, H., 1895. *Le calcaire carbonifère de la Belgique et ses relations avec celui du Hainaut français*. Ann. Soc. géol. Nord., 23: 201-313.

Derycke, F., 1990. *Étude de l'exhaure du projet d'extension de la carrière*. Rapport préliminaire – prospection géophysique. Rapport BGE-058-Hydro-90. S.A. Dolomies de Marche-les-Dames.

de Vries, J.J. and Simmers, I., 2002. *Groundwater recharge : An overview of processes challenges*. Hydrogeology journal, 10, pp. 5-17.

De Vroey, P., 2010. *Mise en évidence de niveaux carbonatés dans la Formation de Neuville par prospection géophysique*. Mémoire de fin d'études (Bachelier - Université de Namur). 35 p.

Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1990. *Physical and Chemical Hydrogeology*. 824 pp. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore : John Wiley & Sons. ISBN: 0471 50744.

Ekmekçi, M., 1993. *Impact of quarries on karst groundwater systems*. International Research and Application Center for Karst Water Resources, Hacettepe University, 06532 Beytepe, Ankara, Turkey.

Environment Agency, May 2007. *Hydrogeological impact appraisal for dewatering abstractions. Using science to create a better place*. Science Report – SC040020/SR1. United Kingdom.

EWTS, 2011. Etude « Tridaine » Rapport d'essais de traçage 2009 – 2010. 36 p.

Fetter, C.W., 2001. *Applied Hydrogeology*, fourth edition. University of Wisconsin - Oshkosh. Upper Saddle River, New Jersey 07458.

Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979. *Groundwater*. ISBN-13 978-0133653120.

Fritsch, S., Guenther, F., Suling, M., 2010. *neuralnet : Training of Neural Networks*. R Package version 1.31.

Gailliez, S., 2013. *Estimation des débits d'étiage pour des sites non jaugés. Application en Région wallonne*. Thèse de doctorat. Gembloux Agro-BioTech - Université de Liège.

Gao, H., 2011. *Groundwater modeling for flow systems with complex geological and hydrogeological conditions*. Procedia (Earth & Planetary Sciences), Xi'an International Conference on Fine Geological Exploration and Groundwater & Gas Hazards Control in Coal Mines.

Gogu, R., 2000. *Advances in groundwater protection strategy using vulnerability mapping and hydrological GIS databases*. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences Appliquées, LGIH, Université de Liège.

Goodwin, A., Thompson, A., Huxley, C.L., Gill, T.S., Buckley, C., 2007. *Mitigating the Impacts of Dewatering in Sand and Gravel Deposits*. Volume 1: Research Overview and Good Practice Guidance. Report to the Minerals Industry Research Organisation and the Department of the Environment, Food and Rural Affairs. Capita Symonds Ltd, East Grinstead.

Gosselin & Drumel sprl (Société Civile d'Ingénieurs Consultants), Mars 1998. Étude d'incidences sur l'environnement - Permis de modifier le relief du sol, Carrière du Nord (Frasnes-Lez-Couvin) s.a. Carneuse.

Groupe de travail Synclinal de Gomézée – Florennes, 2009. Projet concerté de valorisation des eaux d'exhaure - Etude hydrogéologique approfondie (compléments 2007-2009). Résumé non technique relatif aux compléments de calibrage et aux prévisions du modèle numérique - Mise à jour de la note : 29.04.2009.

Gulinck, M., 1966. *Hydrogéologie, Atlas de Belgique (planches 16^A et 16^B)*. Comité national de géographie, commission de l'atlas national. 68 p.

Gumbel, E.J., 1954. *Statistical theory of extreme values and some practical applications*. Applied Mathematics Series, 33. U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards.

Hallet, V. et Meus, P., 2011. *Contexte hydrogéologique des systèmes karstiques de la région de Rochefort (Vallées de la Wamme et la Lomme)*. Geological Survey of Belgium. Professional Papers 2011/2, N.309, 63p. ISSN0378-0902, p 35-46.

Hällgren, O., 2006. *Mine dewatering with submersible pumps*. World pumps, volume 2006, Issue 477, p. 30-31.

IGRETEC (Intercommunale pour le Gestion et la Réalisation d'Etudes Techniques et Economiques) - Janvier 2010. Avant-projet de révision du plan de secteur de Mons-Borinage (planche 45/2) en vue de l'inscription d'une zone d'extraction à Saint-Ghislain. Etude d'incidence de plan de secteur.

INCITEC Ingénierie de l'environnement, Avril 2003. Carrière Calcaire Lambrighs s.a. Etude d'incidences sur l'environnement. Demande de permis d'extraction relative à l'implantation et à l'exploitation de la Carrière de Dolhain-Vicinal. Communes de Baelen et Limbourg.

- Kalbus, E., Reinstorf, F., Schirmer, M., 2006. *Measuring methods for groundwater - surface water interactions : a review*. UFZ - Centre for Environmental Research Leipzig-Halle in the Helmholtz Association, Department of Hydrogeology, Germany.
- Kaufmann, O. and Quinif, Y., 1999. *Cover-collapse sinkholes in the "Tournaisis" area, Southern Belgium*. Engineering Geology, volume 52, Issues 1-2, p. 15-22.
- Langer, W.H., 2001. *Potential Environmental Impacts of Quarrying Stone in Karst - A literature review*. U.S. Geological Survey, Open-file report OF-01-0484. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- Leibniz, M., 1703. *Explication de l'arithmétique binaire*. Mémoires de l'Académie des sciences, p. 85-89.
- Lisboa, P.J.G., 1992. *Neural Networks : Current Applications*. Chapman & Hall, London.
- Lunne, T., Robertson, P.K., Powell, J.J.M., 1997. *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. EF Spon/Blackie Academic, Routledge Publishers, London, 312 p.
- McCulloch, W.S. and Pitts, W., 1943. *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity*. Bulletin of Mathematical Biology, 5(4): 115-133.
- Marion, J.-M., Mottequin, B., Barchy, L., Blockmans, S., Dumoulin, V., 2011. *Contexte géologique et structural de la région de Rochefort (Synclinorium de Dinant, Belgique)*. Geological Survey of Belgium. Professional Papers 2011/2, N.309, 63p. ISSN0378-0902, p.27-38.
- Michel, G. et Thys, G., 2015. *Atlas du Karst Wallon, Bassin de la Lesse Calestienne*. DGRNE - CWePSS asbl. Référence : S2015-05.
- Nemeth, M.S., Solo-Gabriele, H.M., 2002. *Evaluation of the reach transmissivity to quantify exchange between groundwater and surface water*. Journal of Hydrology 274, 145-159.
- Orban, P., Ruthy, I., Brouyère, S., 2006. *Etat quantitatif et qualitatif des eaux souterraines en Région wallonne*. Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du Rapport analytique 2006.
- Passagez, A.-E., 2012. *Carrière de Dolomies de Marche-les-Dames : étude hydrogéologique et modélisation mathématique des conditions d'exhaure*. Mémoire de fin d'études (Master - Université Libre de Bruxelles).
- Piper, A.M., 1944. *A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses*. Transactions, American Geophysical Union 25:914-23.
- Pissart architecture et environnement, Van Der Stricht, Décembre 2008. Inscription d'une zone d'extraction au lieu-dit « les Turluttes » et au titre de compensation planologique : inscription d'une zone naturelle et d'une zone agricole et au titre de compensation alternative : inscription d'un périmètre de réservation pour la réalisation d'un nouvel échangeur autoroutier – Communes de Chaumont-Gistoux et de Walhain - Révision de plan de secteur de Wavre – Jodoigne – Perwez (planche 40/2) - Etude d'incidences de plan.

Pissart architecture et environnement, Février 2010. Révision du plan de secteur de Dinant-Ciney-Rochefort (Planches 53/4 et 54/1) : Inscription d'une zone d'extraction, d'une zone agricole et d'une zone d'espaces verts à Yvoir - Etude d'incidences de plan PHASE II. Service public de Wallonie DGO4.

Pissart architecture et environnement, 2009. Étude d'incidences de la carrière de Lompret.

Polytech Mons, Mars 2008. *Étude hydrogéologique approfondie des Carrières du Fond des Vaulx à Wellin*.

Poty, E., Chevalier, E., Caudron, M., 2002. *Inventaire des ressources du sous-sol de la Région wallonne et des besoins à terme (1995-2001)*. Ministère de la Région wallonne, Direction générale de l'Aménagement du Territoire, du Logement et du Patrimoine, Namur.

Poty, E. et Chevalier, E., 2004. *L'activité extractive en Wallonie. Situation actuelle et perspectives*. Ministère la Région wallonne. Direction Générale de l'Aménagement du Territoire, du Logement et du Patrimoine. D/2004/5322/30.

RAIS, 2009. *Risk Assessment Information System*. University of Tennessee.

Riedmiller, M. and Braun, H., 1993. *A direct adaptive method for faster backpropagation learning : the RPROP algorithm*. Institut für Logik, Komplexität und Deduktionssysteme. University of Karlsruhe.

Rekk, S. et Hallet, V., 2010. *Carte hydrogéologique de Wallonie, planchettes Froidchapelle – Senzeille (57/3-4)*. Édition : Service publique de Wallonie, DGO3 (DGARNE), Belgique. Dépôt légal D/2010/12.796/2- ISBN 978-2-8056-0070-8.

Rentier, C., Delloye, F., Brouyère, S. & Dassargues, A., 2006. *A framework for an optimised groundwater monitoring network and aggregated indicators*. Environmental Geology, 50(2), pp. 194-201, DOI: 10.1007/s00254-006-0200-x.

Robertson, P.K. and Cabal, K.L., 1986. *Soil Behaviour Type*. Gregg Drilling & Testing Inc., Signal Hill, California, USA.

Ronayne, M.J., Juin 2013. *Influence of conduit network geometry on solute transport in karst aquifers with permeable matrix*. Advances in water resources. Elsevier. Volume 56, p 27-34.

Rosenberry, D. and Pitlick, J., 2009. *Effects of sediment transport and seepage direction on hydraulic properties at the sediment-water interface of hyporheic settings*. Journal of Hydrology 07/2009; 373(3-4):377-391. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.04.030

Rushton, K.R. et Tomlinson, L.M., 1979. *Possible mechanisms for leakage between aquifers and rivers*. Journal of hydrology, 40: 49-65.

Rushton, K.R., 1999. *Discussion on unsteady stream depletion from ground water pumping*. Ground Water 37: 805.

Ruthy, I. et Dassargues, A., Août 2005. *Carte hydrogéologique de Wallonie, planchettes Huy - Nandrin (48/3-4)*. Édition : Service publique de Wallonie, DGO3 (DGARNE), Belgique. Dépôt légal D/2011/12/796/3 – ISBN 978-2-8056-0081-4.

- Ruthy, I. et Dassargues, A., 2008. *Carte hydrogéologique de Wallonie, planchettes Philippeville - Rosée (53/5-6)*. Édition : Service public de Wallonie, DGO3 (DGARNE), Belgique. Dépôt légal D/2008/12.796/4 - ISBN 978-2-8056-0062-3.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G., 2002. *Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge*. Hydrogeology, 10, pp. 18-39.
- Schaller, M.F. and Fan, Y., 2009. *River basins as groundwater exporters and importers: Implications for water cycle and climate modeling*. Journal of Geophysical Research, Vol.114, D04103, doi:10.1029/2008JD010636.
- Selker, J.S., Duan, J., Parlange, J., 1999. *Green and Ampt infiltration into soils of variable pore size with depth*. Water Resources Research 35: doi: 10.1029/1999WR900008. ISSN: 0043-1397.
- Shelton, C.W., December 2011. *An analytical and numerical investigation of stream/aquifer. Interaction methodologies*. Thesis, Washington State University - Department of Civil and Environmental Engineering.
- Stavric, V., 2004. *Aquifer Overexploitation And Groundwater Mining*. Ministry of Environment and Physical Planning/UNDP, Skopje, Macedonia.
- Tractebel engineering, Juillet 2013. *Étude d'incidence pour l'exploitation des gisements Hollande et Trieu Collet à Merlemont – Volet hydrogéologique*. Diagnostique préliminaire - Proposition de campagne de reconnaissance. Lhoist, carrières de Merlemont.
- Tractebel, Février 1998. *Étude d'incidence sur l'environnement*. Partie hydrogéologique. Lhoist Industrie S.A. Carrière de la Boverie.
- Train, K., 2009. *Discrete choice methods with simulation*, Second edition. Cambridge University press, 383 p.
- Todd, D.K. and Mays, L.W., 2005. *Groundwater hydrology*, Third Edition. John Wiley and Sons, New York, 636 p.
- Toth, J., 1970. *A conceptuel model of the groundwater regime and the hydrogeological environment*. Journal of hydrology, 10 (1970), pp. 164-176.
- Vernoux, J.F., Willeumier, A., Dörfliger, N., 2007. *Délimitation des bassins d'alimentation des captages et leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses*. Guide méthodologique, rapport BRGM/RP-55874, 75 p.
- Waterloo Hydrogeologic Inc., 2014. *Integrated conceptual and numerical groundwater modeling*. Visual Modflow Flex User's Manual.
- Wildemeersch, S., Orban, Ph., Brouyère, S., Dassargues, A., Juin 2012. *Génération d'un modèle local dans le cadre de l'approfondissement de la carrière de la Boverie*. ArGenCo, Faculté des sciences appliquée, Université de Liège.
- Winter, T.C., Harvey, J.W., Lehn Franke, O., Alley, W.M., 1998. *Surface Water, a single resource*. U.S. Geological Survey Circular 1139. Denver, Colorado.

Zwahlen, F., 2004. *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers* – COST Action 620. European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development, Brussels, Luxembourg: 297 p.

X.1 WEBOGRAPHIE

Banque de données « Dix-Sous », MRW. DGRNE. Direction des eaux souterraines.
<http://carto1.wallonie.be/10SousInt/Default.asp>.

Carte Géologique de Wallonie. : <http://carto1.wallonie.be/geologie/viewer.htm>.

Carte hydrogéologique de Wallonie :
<http://environnement.wallonie.be/cartosig/cartehydrogeo>.

Code Wallon de Bonnes Pratiques : <https://dps.environnement.wallonie.be/home/sols/sols-pollues/code-wallon-de-bonnes-pratiques--cwbp-.html>

Etat des nappes d'eau souterraine de la Wallonie. Service Public de Wallonie, Direction de l'état environnemental, Direction des eaux souterraines. Dépôt légal D/2014/11802/11 - ISBN 978-2-8056-0142-2. <http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas>.

Topomap viewer : <http://www.ngi.be/topomapviewer/public>

XI ANNEXES

ANNEXE 1 : Banque de données FileMaker Pro

FileMaker Pro - [Carrières_Projet_Exhaure 2011-13]

Fichier Edition Affichage Insertion Format Requêtes Scripts Fenêtre Aide

Requêtes de recherche 1 Total

Nouvelle requête Supprimer la requête Exécuter la requête Annuler la recherche

Modèle : Modèle n°1 Format affichage : Enregistrements concordants : Inclure(d) Ignorer(s) Insérer : Opérateurs

Recherches enregistrées

Code poty

Coordonnées Lambert belge

En exploitation ☐ Oui ☐ Intermittente

Roche exploitée

Formation géologique

Etage stratigraphique

Géologie structurale

Nature et épaisseur des terrains de découverte

Extension de la carrière

Production moyenne annuelle en produits finis

Bassin hydrographique

Sous_bassin hydrographique

Code_région_wallonne nappe (SPW)

Masse_eau_souterraine

Carte hydrogéologique (SPW)

Formation hydrogéologique

Type de porosité

Frontières/extensions longitudinales de l'aquifère

Frontières/extensions transversales de l'aquifère

Frontières/extensions longitudinales de la zone (potentiellement) sollicitée

Frontières/extensions transversales de la zone (potentiellement) sollicitée

Limite imperméable (formation)

Limite à potentiel imposé (rivière, source,...)

Mixte

A préciser

Ecoulement de la nappe aquifère

Piezomètre(s)

Perte(s)

Résurgence(s)

Source(s) (BD hydro)	<div></div>
Source(s) (carte IGN)	<div></div>
Eau de surface et cours d'eau	<div></div>
Catégorie du(des) cours d'eau	<div></div>
Rivière drainante/infiltrante/en pseudo-équilibre	<div></div>
Pompage d'eau souterraine	<div></div>
Type de nappe sollicitée	<div></div>
Destination de l'eau souterraine	<div></div>
Cubage de l'eau souterraine	<div></div>
Pompage d'eau de ruissellement	<div></div>
Destination de l'eau de ruissellement	<div></div>
Cubage de l'eau de ruissellement	<div></div>
Eau en fond de fosse	<div></div>
Cote du niveau de la nappe en équilibre sans exhaure	<div></div>
Niveau du plancher de la carrière	<div></div>
Sollicitation d'eaux de nappe	<div></div>
Puits d'exhaure et pompe(s)	<div></div>
Puits de distribution publique d'eau potable	<div></div>
Autre(s) prise(s) d'eau en activité	<div></div>
Sollicitation d'eaux surface	<div></div>
Zone(s) de prévention arrêtée(s) et à définir	<div></div>
Station(s) météorologique(s)	<div></div>
Synthèse hydrogéologique	<div></div>
Carte hydrogéologique	

ANNEXE 2 : Exemple d'une fiche descriptive : la carrière d'Engis

Carrière d'Engis ou de Ramioul (ancienne carrière du Lion)

Code poty	4182
Coordonnées Lambert belge	X : 224440 Y : 141110
En exploitation	<input checked="" type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Intermittente
Roche exploitée	Calcaire, dolomie
Formation géologique	Formation de Seilles, Formation de Lives, Formations de Neffe, Formation de Terwagne, Formation des Avins,
Etage stratigraphique	Viséen et Tournaisien
Géologie structurale	Direction des couches : N90°E Pendage des couches : subvertical
	La région correspond à la terminaison occidentale du synclinal de Seraing qui présente un ennoyage vers l'Est d'une quarantaine de degrés. Le flanc nord de cette structure a disparu suite au passage de la faille d'Engihoul et la carrière s'ouvre dans son flanc sud, subvertical à fortement incliné. Celui-ci s'étend régulièrement W/E sur 1 km environ, mais est ensuite affecté par des failles (liées à la Faille eifélienne) qui découpent le massif en compartiments déplacés latéralement les uns par rapport aux autres. Elles sont également responsables du blanchissement (par microtectonisation et micritisation) et de la karstification du massif. Cette aire profondément tectonisée correspond au nez oriental de l'Anticlinal du Bois d'Engihoul dont le flanc sud plissé est directement en contact avec la Faille eifélienne.
Nature et épaisseur des terrains de découverte	Quelques mètres de terre arable, limons et matériaux pierreux non valorisables
Extension de la carrière	L'exploitant prévoit d'approfondir très prochainement le gisement jusqu'à la cote 70 mètres, créant ainsi un nouvel étage puis le comblera de remblai. Quant au gisement ouest trois évolutions possibles sont envisageables : un approfondissement jusqu'à la cote -30 mètres voire -40 mètres, une extension vers le Nord (zone Raysse), une extension vers le Sud de la zone est. Cette évolution n'est pas encore planifiée en détail et sera fonction de la demande des marchés, liée aux différentes qualités de roches présentes sur le siège.
Production moyenne annuelle en produits finis	2 000 000 tonnes
Bassin hydrographique	Meuse
Sous_bassin hydrographique	Meuse aval
Code_région_wallonne nappe (SPW)	RWN016/011
Masse_eau_souterraine	Schistes houillers/Calcaires du bassin de la Meuse bord Nord
Carte hydrogéologique (SPW)	41/7-8 Jehay-Bodegnée - Saint-Georges-sur-Meuse
Formation hydrogéologique	Aquifère des calcaires du Carbonifère
Type de porosité	Porosité mixte (porosité de pores et porosité de fissures), localement karstifié
Frontières/extensions longitudinales de l'aquifère	A l'ouest : continuité de l'aquifère des calcaires carbonifères jusqu'à la Faille d'Ivoz A l'est : continuité de l'aquifère des calcaires carbonifères jusqu'à son ennoyement au droit de la Faille Eifélienne
Frontières/extensions transversales de l'aquifère	Au nord : l'aquiclude à niveaux aquifères du Houiller Au sud : continuité de l'aquifère des calcaires carbonifères jusqu'à la Faille Eifélienne
Frontières/extensions longitudinales de la zone (potentiellement) sollicitée	A l'ouest : continuité des formations viséenne et tournaisienne jusqu'au ruisseau d'Engihoul et liaison hydraulique avec les grès famenniens A l'est : continuité des formations viséenne et tournaisienne qui s'ennoyent
Frontières/extensions transversales de la zone (potentiellement) sollicitée	Au nord : les formations schisto-gréseuses du Houiller Au sud : continuité des formations viséenne et tournaisienne limitée par la Faille Eifélienne
Limite imperméable (formation)	Les schistes houillers et la Formation famennienne schisteuse de Mariembourg
Limite à potentiel imposé (rivière, source,...)	La Meuse et le ruisseau d'Engihoul

Ecoulement de la nappe aquifère	Les eaux s'écoulent au droit du synclinal en direction du ruisseau d'Engihoul, qui vient alimenter la Meuse en aval
Piézomètre(s)	<ul style="list-style-type: none"> - Chéna pz1 : puits foré à 380 mètres au SW du site (X : 224106 Y : 140932); nappe sollicitée : massif schisto-gréseux du bassin de Namur (Frasnien, Famennien) - Chéna pz2 : puits foré à 415 mètres au sud du site (X : 224391 Y : 140696); nappe sollicitée : calcaires carbonifères du bord sud du bassin de Namur - Chéna pz3 : puits foré à 620 mètres au sud de la carrière (X : 224532 Y : 140498); massif schisto-gréseux du bassin de Namur (Frasnien, Famennien) - Chéna pz5 : puits foré à 645 mètres au SE du site (X : 224966 Y : 140734); nappe sollicitée : calcaires carbonifères
Perte(s)	<ul style="list-style-type: none"> - Ancienne perte du ruisseau d'Engihoul (X : 223975 Y : 141049) - Chantoir sud (X : 224813 Y : 141119) - Chantoir des Orties (X : 225041 Y : 140933) - Grand chantoir du Chant des Oiseaux (X : 225104 Y : 140932) Dolines et pertes du Chant des Oiseaux
Résurgence(s)	- Résurgence de Bruta au droit de l'aquiclude à niveaux aquifère du Houiller (X : 224858 Y : 141852)
Source(s) (BD hydro)	Non
Source(s) (carte IGN)	Non
Eau de surface et cours d'eau	<ul style="list-style-type: none"> - La carrière se situe en rive droite de la Meuse, orientée SW/NE. La Meuse correspond au niveau de base régional dont le thalweg est à 70 mètres. - Le ruisseau d'Engihoul prend sa source au droit des grès du Dévonien inférieur, traverse les calcaires carbonifères et les grès du Famennien, à l'ouest du site d'Engis, avant de se jeter dans la Meuse.
Catégorie du(des) cours d'eau	<ul style="list-style-type: none"> - La Meuse : voie navigable - Le ruisseau d'Engihoul : 2ème catégorie
Rivière drainante/infiltrante/en pseudo-équilibre	<ul style="list-style-type: none"> - La Meuse : drainante - Le ruisseau d'Engihoul : drainant
Pompage d'eau souterraine	Oui
Type de nappe sollicitée	Nappe libre
Destination de l'eau souterraine	
Cubage de l'eau souterraine	29 940 m³/an
Pompage d'eau de ruissellement	Oui
Destination de l'eau de ruissellement	Rejet
Cubage de l'eau de ruissellement	400 000 m³/an
Eau en fond de fosse	Oui
Cote du niveau de la nappe en équilibre sans exhaure	
Niveau du plancher de la carrière	Fosse est : approfondissement jusqu'à la cote +70 mètres Fosse ouest : cote actuelle de +0 mètres
Sollicitation d'eaux de nappe	
Puits d'exhaure et pompe(s)	- Exhaure dans la carrière du Lion (X : 223955 Y : 141240); titulaire : s.a. Carmeuse

ANNEXE 3 : Tableau de l'ensemble des formations hydrogéologiques de Wallonie

Unité hydrogéologique	Abréviation	couleur (+num)	code BD
Unité hydrogéologique indéterminée	UH_indeterminee		CHX000
Aquifère alluvial	AF_alluvions	1	CHC001
Aquifère des tourbes	tourbes		CHC002
Aquitard limoneux	AT_limons	2	CHC003
Aquifère des terrasses fluviales	AF_allu_terrasses	3	CHC004
Aquifère des sables du Miocène	AF_sables_miocenes	4	CHC005
Aquiclude d'argiles de remplissage	AC_argiles_locales	58	CHC012
Aquifère des sables de remplissage	AF_sables_locaux	5	CHC006
Aquiclude des argiles bartoniennes	AC_argiles_bartoniennes	6	CHC007
Aquifère des sables de l'Eocène	AF_sables_eocenes	7	CHC008
Aquiclude - Aquitard des argiles de l'Eocène	ACT_argiles_eocenes	8	CHC009
Aquifère des sables du Paléocène	AF_sables_paleocenes	9	CHC010
Aquiclude des argiles du Paléocène	AC_argiles_paleocenes	10	CHC011
Aquifère du Crétacé indifférencié	AF_cretace		CHM023
Aquifère des craies du Crétacé	AF_craies	11	CHM001
Aquiclude des marnes du Campanien	AC_marnes_campaniennes	12	CHM002
Aquifère - Aquitard de Vaals	AFT_Vaals	13	CHM003
Aquitard du Santonien	AT_Santonien	14	CHM004
Aquifère des sables du Santonien	AF_sables_santonien	15	CHM005
Aquiclude des marnes du Turonien	AC_marnes_turonien	16	CHM006
Aquifère du Cénomano-Albien	AF_cenomanien_albien	17	CHM007
Aquiclude de remplissage du Hainaut	AC_Hainaut	18	CHM008
Aquifère de Longwy - Mont-Saint-Martin	AF_Longwy_Mont-Saint-Martin	19	CHM009
Aquiclude de Grandcourt	AC_Grandcourt	20	CHM010
Aquifère d'Aubange - Messancy	AF_Aubange_Messancy	21	CHM011
Aquiclude d'Ethe	AC_Ethe	22	CHM012
Aquitard d'Arlon - Hondelange	AT_Arlon_Hondelange	23	CHM013
Aquiclude d'Arlon	AC_RBM	24	CHM014
	AC_Posterie		
	AC_Strassen		
	AC_Trite		
Aquifère de Virton	AF_Virton	25	CHM015
Aquifère d'Orval	AF_Orval	26	CHM016
Aquifère de Florenville	AF_Florenville	27	CHM017
Aquifère de la Chevratte	AF_Chevratte	28	CHM018
Aquiclude à niveaux aquifères de Jamoigne	ACF_Jamoigne	29	CHM019
Aquifère de Mortinsart	AF_Mortinsart	30	CHM020
Aquiclude d'Attert	AC_Attert	31	CHM021
Aquiclude à niveaux aquifères d'Habay	ACF_Habay	32	CHM022
Aquifère du Permien	AF_Permien		CHP032
Aquiclude à niveaux aquifères du Houiller	ACF_Houiller	33	CHP001
Aquifère des calcaires dévono-carbonifères	AF_calcaires_devono_carbo	34	CHP002
Aquifère des calcaires du Carbonifère	AF_calcaires_carbo	34	CHP003
Intercalation schisteuse des calcaires dévono-carbonifères	AFC_calcaires_devono_carbo	34	CHP004
Aquiclude des schistes du Carbonifère	AC_schistes_carbo	35	CHP005
Aquitard du Carbonifère	AT_carbo	36	CHP006

Aquifère - Aquitard - Aquiclude de l'Hastarien	AFCT_Hastarien	37	CHP007
Aquifère d'Hastièrre	AF_Hastiere	37	CHP008
Aquifère des grès du Famennien	AF_gres_famenniens	38	CHP009
Aquitard du Famennien	AT_Famennien	39	CHP010
Aquitard du Famennien - Frasnien	AT_Famennien_Frasnien	39	CHP011
Aquitard du Frasnien	AT_Frasnien	40	CHP012
Aquiclude du Famennien	AC_Famennien	41	CHP013
Aquiclude du Famennien - Frasnien	AC_Famennien_Frasnien	41	CHP014
Aquiclude du Frasnien	AC_Frasnien	42	CHP015
Aquifère des calcaires du Frasnien	AF_calcaires_frasniens	43	CHP016
Aquifère des calcaires du Givetien	AF_calcaires_givetiens	44	CHP017
Aquiclude - Aquitard du Givetien	ACT_Givetien	45	CHP018
Aquitard de l'Eifelien	AT_Eifelien	46	CHP019
Aquifère de l'Eifelien	AF_Eifelien	47	CHP020
Aquifère à niveaux aquicludes du Dévonien inférieur	AFC_Devonien_inf	57	CHP030
Aquiclude du Dévonien inférieur	AC_Devonien_inf	48	CHP021
Aquiclude à niveaux aquifères du Dévonien inférieur	ACF_Devonien_inf	49	CHP022
Aquitard à niveaux aquifères du Dévonien inférieur	ATF_Devonien_inf	58	CHP031
Aquitard à niveaux aquicludes du Dévonien inférieur	ATC_Devonien_inf	50	CHP023
Aquitard à niveaux aquicludes de Villé	ATC_Ville	51	CHP024
Aquifère de Fépin	AF_Fepin	52	CHP025
Aquitard à niveaux aquifères du socle cambro-silurien	ATF_Cambrien_Silurien	53	CHP026
Aquiclude à niveaux aquifères du socle cambro-silurien	ACF_Cambrien_Silurien	59	CHP033
Aquifère du socle cambro-silurien	AF_Cambrien_Silurien	54	CHP027
Aquitard à niveaux aquicludes du socle cambro-silurien	ATC_Cambrien_Silurien	56	CHP029
Aquiclude du socle cambro-silurien	AC_Cambrien_Silurien	55	CHP028